

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## DIAGNOSTIKA PROUDOVODNÉ DRÁHY SILNOPROUDÝCH PŘÍSTROJŮ

DIAGNOSTICS OF CURRENT PATH OF HIGH-CURRENT APPARATUSES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Váša

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Šimek

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Lukáš Váša

**ID:** 184146

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Diagnostika proudovodné dráhy silnoproudých přístrojů

**POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Nastudujte metody diagnostiky proudovodné dráhy silnoproudých přístrojů.
2. Vytvořte přehled jednotlivých diagnostických metod a jejich případných výhod a nevýhod.
3. Za pomoci vybrané metody proveďte diagnostiku proudovodné dráhy konkrétního elektrického přístroje.
4. Na základě provedené diagnostiky navrhněte takové konstrukční úpravy přístroje, které by vedly ke snížení výrobních nákladů při zachování, popřípadě vylepšení stávajících technických parametrů.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] MOBLEY, R. Keith. Predictive Maintenance-50. Plant Engineer's Handbook. 50/867-50/888. DOI: 10.1016/B978-075067328-0/50052-5. ISBN 978-0-7506-7328-0.

[2] WATERER, S. Frank. Predictive Maintenance Technologies That Enhance Power Equipment Reliability [online]. Schneider Electric USA, 2012. Dostupné z: [https://www.schneider-electric.com/en/download/document/998-2095-01-16-12AR0\\_EN/](https://www.schneider-electric.com/en/download/document/998-2095-01-16-12AR0_EN/)

[3] KOPAL, Ivan a Pavol KOŠTIAL. Základy infračervenej termografie: experimentálne metódy materiálového inžinierstva. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra materiálového inženýrství, 2011. ISBN 978-80-248-2519-9.

[4] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřící obvody. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 22.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. David Šimek

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na teoretický rozbor metod technické diagnostiky se zaměřením na silnoprůdová zařízení. Je zpracován přehled metod používaných v technické praxi. Dále se práce zabývá namáháním proudovodné dráhy průchodem proudu, následně zvláště tepelným namáháním částí přístrojů a jejich oteplováním. Popsány jsou diagnostické metody měření přechodového odporu a teplot, u jednotlivých metod jsou uvedeny jejich výhody a nevýhody. Praktickou náplní práce je diagnostika odpínače a odpojovače pomocí měření přechodových odporů všech kontaktů proudovodné dráhy a následné měření a vyhodnocení oteplení součástí přístrojů pomocí termovizní kamery. Na základě tohoto měření jsou navrženy úpravy odpojovače vedoucí k finančním úsporám.

## **Klíčová slova**

diagnostika silnoprůdových zařízení, odpínač, odpojovač, emisivita, termovizní kamera

## **Abstract**

Bachelor's thesis is focused on the theoretical analysis of methods of technical diagnostics with focus on high-current devices. An overview of the methods used in technical practice is elaborated. In addition, the thesis deals with the strain of current carrying path, subsequently the work focuses on the thermal stress of parts of the current carrying path and its temperature rise. Methods of diagnostics by measuring transient resistance and methods of measurement of temperatures are described and each of the methods' advantages and disadvantages are stated. The practical part is focused on the diagnostics of the switch disconnector and the disconnector by measurement of the transient resistances of all contacts of the current carrying paths and the following measurement and evaluation of temperature rise of the components by thermal imaging camera. Adjustments to the disconnector leading to financial savings are suggested on basis of these measurements.

## **Keywords**

high-current devices diagnostics, switch disconnector, disconnector, emissivity, thermal imaging camera

## **Bibliografická citace:**

VÁŠA, Lukáš. *Diagnostika proudovodné dráhy silnoprůdých přístrojů*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117456>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce David Šimek.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Diagnostika proudovodné dráhy silnoprůdých přístrojů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidovi Šimkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne:

.....  
podpis autora



# Obsah

<b>1. Úvod.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Technická diagnostika .....</b>	<b>12</b>
2.1. Definice technické diagnostiky .....	12
2.2. Důležitost diagnostiky.....	12
2.2.1 Metody údržby .....	13
2.3. Měřicí a zkušební metody .....	13
2.3.1 Diagnostika off-line a on-line .....	14
2.3.1.1 Funkční diagnostika.....	14
2.3.1.2 Testovací diagnostika .....	14
<b>3. Diagnostika silnoprůdých zařízení .....</b>	<b>15</b>
3.1. Vizuální kontroly .....	15
3.2. Analýza izolačních kapalin .....	15
3.3. Monitorování částečného výboje .....	15
3.4. Infračervené (termografické) kontroly a měření teplot.....	16
3.5. Analýza elektrických obvodů.....	16
3.6. Analýza vibrací .....	16
3.7. Shrnutí klasických metod.....	17
3.8. Možné dělení diagnostiky silnoprůdých zařízení.....	18
<b>4. Proudovodné části .....</b>	<b>19</b>
4.1. Mechanické namáhání.....	19
4.2. Tepelné namáhání .....	21
4.2.1 Vznik tepla průchodem proudu.....	22
4.2.2 Teplo vznikající na kontaktech .....	23
4.2.2.1 Přechodový odpor.....	23
<b>5. Měření přechodového odporu .....</b>	<b>25</b>
<b>6. Měření teplot.....</b>	<b>27</b>
6.1. Dotykové měření teplot.....	27
6.2. Bezdotykové měření teplot .....	29
6.2.1 Teoretické základy .....	30
6.2.1.1 Planckův vyzařovací zákon .....	31

6.2.1.2	Wienův posunovací zákon.....	32
6.2.1.3	Stefan-Boltzmannův zákon .....	32
6.2.2	Emisivita a její určování .....	32
6.2.3	Termografie .....	34
6.2.4	Termovize .....	34
<b>7.</b>	<b>Teplotní diagnostika.....</b>	<b>37</b>
7.1.	Úvod do měření.....	37
7.2.	Měření na odpínači CUB S2.25.400.S... V1a .....	39
7.2.1	Měření přechodového odporu.....	39
7.2.2	Určení emisivity materiálu.....	41
7.2.3	Měření oteplení částí proudové dráhy .....	43
7.2.4	Vyhodnocení měření.....	46
7.3.	Měření na odpojovači QAK 12.400.25/1.P.R.-.-.200/3 .....	47
7.3.1	Měření přechodového odporu.....	48
7.3.2	Určení emisivity materiálu.....	49
7.3.3	Měření oteplení částí proudové dráhy .....	50
7.3.4	Vyhodnocení měření.....	53
7.4.	Snímky z termokamery SAT-HY 6800 – z části 7.2 .....	55
7.5.	Snímky pořízené termokamerou FLIR E95 – z části 7.3 .....	56
7.6.	Poznátky z měření termovizní kamerou.....	56
<b>8.</b>	<b>Modifikace přístroje.....</b>	<b>58</b>
<b>9.</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>61</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 3-1 Termosnímek trojpólového odpojovače zapojeného do série.....	16
Obrázek 4-1 Síly působící v magnetickém poli [7] .....	20
Obrázek 4-2 Síla vznikající interakcí s magnetickým polem vodiče 2 [8] .....	20
Obrázek 4-3 Závislost odporu $R_s$ na úbytku napětí a teplotě ve styku - měď [8].....	24
Obrázek 5-1 Čtyřvodičová (Kelvinova) metoda měření odporu [10].....	25
Obrázek 6-1 Vlnové délky elektromagnetického záření [15] .....	29
Obrázek 6-2 Vyzařovací charakteristiky černého tělesa [15] .....	31
Obrázek 6-3 Charakteristické vyzařování těles o různých emisivitách [15] .....	33
Obrázek 6-4 Termokamera SAT-HY 6800.....	35
Obrázek 6-5 Termokamera FLIR E95 [18] .....	35
Obrázek 7-1 Schéma zapojení pro diagnostikované přístroje.....	37
Obrázek 7-2 Kontakty proudovodné dráhy odpínače .....	39
Obrázek 7-3 Měření přechodového odporu .....	40
Obrázek 7-4 a) Měření referenčním teploměrem; b) úprava termosnímku .....	41
Obrázek 7-5 Měřené body - určování emisivity částí odpínače .....	41
Obrázek 7-6 Průběhy oteplení částí odpínače CUB S2.25.400.S... V1a .....	45
Obrázek 7-7 Legenda k průběhům oteplení.....	45
Obrázek 7-8 Zapojení pólů odpojovače do série .....	47
Obrázek 7-9 3D model odpojovače QAK.....	47
Obrázek 7-10 Měření odporu pole odpojovače .....	48
Obrázek 7-11 Měřené body - určování emisivity částí odpojovače .....	49
Obrázek 7-12 3D model pólu 1 - oteplení částí .....	50
Obrázek 7-13 Průběhy oteplení částí odpojovače – Pól 1 .....	51
Obrázek 7-14 Průběh oteplení nožů.....	53
Obrázek 7-15 Odrazy na pólech odpojovače .....	54
Obrázek 7-16 Termosnímek přechodu přívodní kabel - vstupní praporec .....	55
Obrázek 7-17 Termosnímek pevného a pohyblivého kontaktu .....	55
Obrázek 7-18 Termosnímek přechodu výstupní praporec - výstupní kabel.....	55
Obrázek 7-19 Termosnímek transformátoru TVB U 168.75/107.....	55
Obrázek 7-20 Termosnímek detailu a) místa s cizí vrstvou; b) obroušené místo.....	55

Obrázek 7-21 Termosnímek připojovacího pásu odpínače .....	55
Obrázek 7-22 Detail a) hlavního kontaktu, b) šroubového spoje .....	56
Obrázek 7-23 Příklad tepelné stopy .....	56
Obrázek 7-24 Příklad tepelného odrazu.....	57
Obrázek 7-25 Demonstrace zkreslení výsledku při neznalosti emisivity .....	57
Obrázek 8-1 Praporec odpojovače - rozvinutý tvar .....	59
Obrázek 8-2 Upravený praporec - rozvinutý tvar .....	59
Obrázek 8-3 Srovnání praporců .....	60

## Seznam tabulek

Tabulka 3-1 Metody monitorování stavu zařízení [6] .....	17
Tabulka 6-1 Přehled dotykových senzorů teplot [11],[13],[14] .....	28
Tabulka 6-2 Přehled bezdotykového měření teplot [11].....	30
Tabulka 6-3 Emisivita vybraných materiálů [11] .....	33
Tabulka 6-4 Technické parametry SAT-HY 6800 [19].....	36
Tabulka 6-5 Technické parametry FLIR E95 [18] .....	36
Tabulka 7-1 Přehled přístrojů užitých při diagnostice .....	38
Tabulka 7-2 Naměřené hodnoty přechodových odporů.....	40
Tabulka 7-3 Určení emisivity materiálů odpínače.....	42
Tabulka 7-4 Maximální dovolené hodnoty teplot a oteplení částí elektrických přístrojů [20] .....	43
Tabulka 7-5 Hodnoty teplot měřených částí odpínače .....	44
Tabulka 7-6 Hodnoty vypočítaného oteplení částí odpínače .....	44
Tabulka 7-7 Odporů proudovodné dráhy odpojovače .....	48
Tabulka 7-8 Hodnoty emisivit - odpojovač QAK.....	49
Tabulka 7-9 Oteplení proudovodných částí odpojovače .....	50
Tabulka 7-10 Hodnoty teplot a oteplení na kontaktních nožích .....	52

# 1. ÚVOD

S vývojem společnosti přišel a stále přichází také technický pokrok v podobě zdokonalování známých zařízení, ale také vyvíjení stále nových technologií. Největší důraz je kladen na provozuschopnost a spolehlivost všech zařízení. Skrze tyto okolnosti získává čím dál většího významu obor zabývající se zabezpečením pohotovosti, sledováním vlastností, zkrácením neaktivity zapříčiněné poruchami, predikcí a případnou lokalizací poruchy, určováním životnosti aj. – diagnostika. Diagnostika sama o sobě musela rovněž projít dlouhým vývojem a zdokonalováním diagnostických metod, kde se zvláště v poslední době uplatňují on-line metody využívající umělou inteligenci, umožňující provádět diagnostická měření nepřetržitě 24/7 a vcelku jednoduše uchovávat získaná data k dalšímu zpracování.

Výše zmíněné platí také pro elektrická silnoproudá zařízení, u kterých navíc přibývá možné nebezpečí úrazu elektrickým proudem při defektu. Jednotlivé části silnoproudých přístrojů vedoucí elektrický proud, proudovodné části, jsou právě průchodem proudu namáhány mechanicky a tepelně. Tepelné namáhání ovlivňuje krom vnějších vlivů hlavně odpor proudových částí, s jehož růstem narůstají také tepelné ztráty. Velice významným zdrojem tepla jsou kontakty, na kterých je sledován přechodový odpor.

Tyto tepelné ztráty nejsou zpravidla žádoucí z ekonomického, ale hlavně z funkčního hlediska. Volba materiálů s vhodnými vlastnostmi, u elektrických kontaktů volba vhodného typu styku a velikosti přitlačné síly, je tak nesmírně důležitá.

Přes sebelepší materiály však k tepelným ztrátám dochází a projeví se oteplením jednotlivých částí přístrojů. Ke správné a bezporuchové funkčnosti zařízení ale nesmí překročit přípustnou mez, což je další okruh diagnostiky – měření teplot. Existuje jen málo fyzikálních veličin a vlastností, které by nebyly závislé na teplotě, proto je měření teplot jednou z nejdůležitějších diagnostických šetření.

Obecně lze provádět měření dotyková a bezdotyková. Jedny z nejmodernějších metod měření teplot jsou metody termografické, které plošně snímají teplotní pole a v případě termovizních systémů pořizují dále zpracovatelné záznamy. Zpracováním těchto záznamů se získávají cenné informace, které mohou posloužit k zabránění defektu či zdokonalení přístrojů.

## **2. TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA**

### **2.1. Definice technické diagnostiky**

Pojem diagnostika vychází z řeckého diagnosis – rozeznávání, určení. Obecně se diagnostikou rozumí nauka zabývající se vyhledáváním znaků určitého druhu a možných symptomů chorob, ať už živého či neživého objektu. Je tvořena znalostí teorie, metod organizace procesu diagnózy, ale také principy funkčnosti prostředků provádějících diagnózu. Určuje-li se stav technického objektu, jedná se o technickou diagnostiku. [1]

Dle [2, str. 41] je definice následovná: „Technická diagnostika je obor, který se zabývá metodami a prostředky na zjišťování stavu technických zařízení, k určování míst poruch a jejich příčin.“ Zjišťování stavu se rozumí zkoumání, zda je na zařízení nějaká porucha, kterou se rozumí nejen porucha, která by odstavila zařízení z provozu, ale jakékoli vychýlení z dovolených funkčních mezí. [2]

### **2.2. Důležitost diagnostiky**

S intenzivním vývojem techniky a zvláště pak se vzrůstající závislostí lidí na funkčnosti technických zařízení se zvyšují nároky na jejich spolehlivost. Znamená to vynaložit větší úsilí při zjišťování stavu technických zařízení při výrobě, provozu a údržbě, tak aby byla zajištěna co největší provozuschopnost. [2]

Přínosy diagnostiky do všech procesů, kterými výrobky, stroje, elektrická zařízení atd. procházejí, jako je výroba, provoz, údržba, ale i opravy už nastalých poruch, se projevují i ekonomicky. Zabrání se totiž dalšímu postupu vadného výrobku výrobou, popř. až ve výstupní kontrole. Význam této části diagnostiky spočívá zejména ve zmenšení počtu záručních řízení, v ideálním případě k úplnému odstranění. Další prakticky vyjádřený ekonomický efekt diagnostiky je patrný z provozu zařízení, kdy dochází k rozboru příčin již nastalých poruch. Tyto rozборы jsou archivovány v databázích, dále zpracovávány a výstupem z nich pak mohou být zlepšení poruchových částí zařízení, např. doporučením změny v technologickém procesu výroby nebo úpravou pracovního prostředí zařízení. V případě údržby a opravárenství má diagnostika nezastupitelné místo, nejen že je schopna určit místo poruchy, ale může

mít vlastní aparát k tomu, aby mohla vydat pokyny pro údržbu a došlo tak k rychlému opravení poruchy bez zbytečných časových a jiných ztrát. [3]

### 2.2.1 Metody údržby

Už bylo zmíněno, že údržba velice úzce souvisí s diagnostikou. Podle procesu, pracovního prostředí nebo věku zařízení může být zavedena jedna nebo více z níže uvedených strategií:

- Reaktivní údržba, tj. údržba po poruše

Jedná se o nejméně vhodnou a v kontextu možných důsledků také nejnákladnější variantu údržby, při které pokud dojde k poruše na objektu, práce na opravě se provádí spíše až jako nouzový případ. [5] Následkem poruchy na jednom zařízení může být následné zničení okolních objektů a hlavně narušení bezpečného provozu. [4]

- Preventivní údržba, tj. údržba dle časového plánu

Tato metoda rovněž není zcela ideální. Provádí se totiž podle statisticky vypočítaných termínů oprav jednotlivých součástí, tedy bez ohledu na aktuální stav zařízení. Je rovněž předem dán seznam kontrol, čištění, testování a náhrady součástek. [4][5]

- Prediktivní údržba (též pravidelná diagnostika), tj. údržba dle skutečného stavu objektu

Prediktivní údržba nabízí nejlevnější, nejefektivnější metodu snižování neaktivity kvůli poruchám zařízení. Údržba je plánovaná podle diagnostického hodnocení, které zahrnuje faktory jako stáří zařízení, působení prostředí, využití a další. [5] Pro prediktivní údržbu je nezbytné neustále znát skutečný stav objektu a poté na základě trendu měřených hodnot lze v předstihu určit nutnost údržby. K odstávkám tak dochází pouze v případech, kdy je to nutné. [1]

### 2.3. Měřicí a zkušební metody

Diagnostický systém je spoluurčován také měřicími a zkušebními metodami, které se dříve braly málo v potaz při konstrukčním řešení zařízení. Nejvhodnější jsou totiž takové metody, u kterých není nutná demontáž diagnostikovaného zařízení. Vyplácí se

tak zabudované snímače, jejichž vývody jsou soustředěny do diagnostického zařízení, které umožní mnohonásobné využití, použití nepřímých metod měření a kontrolu funkčnosti čidel a měřících obvodů mezi sebou. Pro ověření funkčního bloku slouží metoda porovnání hodnot veličiny popisující funkci bloku a maximálních dovolených. [2]

### **2.3.1 Diagnostika off-line a on-line**

Tato vlastní diagnostická měření a šetření lze rozdělit do dvou skupin podle toho, zda je diagnostikovaný objekt mimo provoz - off-line, pak mluvíme o diagnostice testovací, nebo v provozu – on-line, pak se jedná o funkční diagnostiku. [3]

#### **2.3.1.1 Funkční diagnostika**

Jak už bylo řečeno, funkční diagnostika probíhá za provozu zařízení, znamená to, že měřící aparatura je trvale nebo v určitých intervalech připojena k diagnostikovanému předmětu a dochází tak k pravidelnému monitorování technického stavu a jeho vyhodnocení. Diagnostický systém pak může při překročení mezních bezpečnostních stavů vyřadit zařízení z provozu nebo, za předpokladu, že je součástí zpětné vazby řídicího systému (např. CAT – Computer Aided Testing), automaticky lokalizovat poruchu a v některých případech dokonce vyřešit poruchovou situaci bez lidského zásahu, a to pomocí záložních funkčních bloků. [4]

#### **2.3.1.2 Testovací diagnostika**

Výklad diagnostiky v režimu off-line může být rozdílný v jednotlivých firmách. Obvyklý výklad je ten, že se šetření provádí na zařízení, které je mimo provoz a sledují se odezvy na zkušební podněty. Jiná možnost jsou tzv. kolektory dat, které nahromadí data při provozu, avšak kromě jejich okamžitého zpracování se provádí následně i podrobná analýza na jiném pracovišti. [4]



### **3. DIAGNOSTIKA SILNOPROUDÝCH ZAŘÍZENÍ**

Předchozí kapitola byla věnována obecnému úvodu do diagnostiky, která platí pro většinu technických zařízení. Metody spadající do technické diagnostiky jsou popsány v příslušné literatuře, z které bylo čerpáno. Dále se práce zaměřuje už jen na diagnostiku silnoproudých zařízení, které jsou předmětem této bakalářské práce. V této kapitole jsou uvedeny některé metody diagnostiky, prováděné na silnoproudých zařízeních.

#### **3.1. Vizuální kontroly**

Hodnocení systému, prováděné profesionálními techniky, jsou často první provedené kontroly od původní instalace zařízení. Je zajišťováno vizuální kontrolou všech částí zařízení. Hodnocení tak určuje elektrické a mechanické zdraví elektrického zařízení. [5] Vizuální kontrola je stále životaschopnou predikcí nástroje údržby a měla by být zahrnuta do celkového programu řízení údržby zařízení. [6]

#### **3.2. Analýza izolačních kapalin**

Tato diagnostika je součástí šetření každého elektrického přístroje plněného olejem, např. olejový transformátor. Zahrnuje zkoušky hlavních funkcí oleje – izolační a chladicí. [3] Analýza oleje může detekovat poškození systému olejo-papírové izolace vedle dalších potencionálních problémů. Běžné testy prováděné na elektrických izolačních olejích jsou zaměřeny na obsah vlhkosti, výši pH faktoru, dielektrické strategie a koncentrace a dávky některých rozpuštěných plynů v oleji. [5]

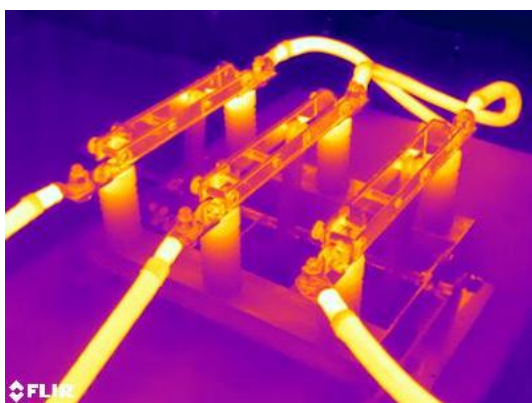
#### **3.3. Monitorování částečného výboje**

Částečný výboj je hlavním indikátorem poškození izolace a objevuje se u elektrického zařízení vysokého napětí, často větší než 2 kV. Čím vyšší napětí, tím vyšší potenciál pro poškození nebo poruchu. Izolační systém je stárnutím náchylnější k poškození, proto nepřetržité sledování umožňuje včasné varování předcházející poškození izolace. Sledování částečného výboje je použitelné na vybavení od 5 kV až 500 kV, u kterého věk izolace může působit problémy. [5]

### 3.4. Infračervené (termografické) kontroly a měření teplot

Infračervené kontroly používají infračervenou kameru na detekování anomálií nepozorovatelných pouhým okem. V elektrických zařízeních infračervené kontroly identifikují tzv. hot spoty, které mohou být předchůdci poruchy. Velmi výhodné je použití tzv. infračerveného okna instalovaného do krytu přístroje, umožňuje tak trvalý přístup pro kontroly elektrických komponentů bez přerušení provozu. Taková okna jsou vyrobena z materiálu podobného sklu, který je průchozí infračervenému záření a umožňuje registrovat hot spoty termografickou kamerou.

Měření teplot, např. při provozu zařízení – on-line, umožňuje 24/7 přístup k rizikovým bodům spojení, kde nemůže být použita tradiční termografie. [5] Podrobněji budou tyto metody rozebrány v dalších kapitolách. Příklad termovizního snímku využívající snímání infračerveného záření je na Obr. 3-1.



Obrázek 3-1 Termosnímek trojpólového odpojovače zapojeného do série

### 3.5. Analýza elektrických obvodů

Monitory elektrického obvodu zaznamenávají data týkající se napětí, proudu a energie. Také nabízí celou řadu vlastností pro snímání kvality energie (analýza vlnového tvaru, záznam poruchy, detekce poruchy), aby bylo možné určit kdy a kde se objeví nebezpečné a ničivé propady a výkyvy. [5]

### 3.6. Analýza vibrací

Velká část strojů je složena z elektromechanických systémů, i proto je monitorování vibrací primárním nástrojem programů prediktivní údržby. Za poslední roky většina těchto programů přijala používání mikroprocesorových, jednokanálových sběračů dat a softwaru na bázi Windows pro získávání, správu a vyhodnocování vibrační energie

vytvořené těmito elektromechanickými systémy. Monitorování vibrací je převážně používáno pro diagnostiku rotačních zařízení, ale lze využít také k analýze jakéhokoli elektromechanického zařízení, bez ohledu na složitost pohybu, např. hydraulických a pneumatických válců či výkonových vypínačů. [6]

### 3.7. Shrnutí klasických metod

Výše uvedené metody patří k nejčastějším způsobům stanovování technického stavu např. na zařízeních rozvoden. Stručný přehled metod určujících kondici zařízení a strojů ukazuje Tabulka 3-1, kde je vidět, u kterých zařízení jsou používány jaké metody a které problémy mohou detekovat.

**Tabulka 3-1 Metody monitorování stavu zařízení [6]**

Metoda	Využití na	Detekované problémy
Vibrace	Rotující stroje (čerpadla, turbíny atd.), výk. vypínače	nesouosost, nerovnováha, mechanické uvolnění, vadné lopatky rotoru, víření oleje
Šokový impulz	Rotující stroje	zhoršení stavu ložisek
Infračervená termografie, měření teplot	Bojlery, komponenty parních systémů, rozvaděče, rozvodny elektrické energie, regulatory motoru, silnoprůdová zařízení	tepelné trhliny, poškození izolace, uvolněné elektrické spoje aj.
Sledování trendu výkonu	tepelné výměníky, spalovací motory, čerpadla, kompresory	zhoršení účinnosti a výkonu kvůli vadným komponentům
Testy elektrické izolace	vinutí motorů a generátorů, rozvodná zařízení	klesající trendy kondice izolací, zkrat, obrácení cívek
Analýza poruchového plynu a izolačních kapalin	Jističe, transformátory a další ochranná zařízení	přehřívání, vlhkost, kontaminace izolační kapaliny
Testování ochranného relé a čas vybavení	Jističe, transformátory a další ochranná zařízení	zhoršující se nebo nebezpečná výkonnost
Analýza časových, frekvenčních charakteristik	usměrňovače, napájecí zdroje, měniče, ac a dc regulatory, generátory	degradace polovodičových obvodů a dalších elektrických komponentů

### **3.8. Možné dělení diagnostiky silnoprůdých zařízení**

Dle [3] se rozlišují dva základní typy přístupu k řešení diagnostického problému. Jedním z nich je přístup fenomenologický, u kterého je objektem zájmu pouze reakce diagnostikovaného objektu na přiložené diagnostické signály. Jedná se o historicky starší přístup, v určitých případech i méně náročný pro obsluhu. Jelikož většinou nevyžaduje žádnou speciální aparaturu, není nikterak nákladný. V tomto ohledu je opakem druhý přístup – strukturální, který se zajímá o dění v samotné struktuře diagnostikovaného objektu. Vysoká cena měřicí aparatury a značná složitost provedení vyžadují kvalifikovanou obsluhu. I přesto se však čím dál častěji začíná využívat i na pracovištích diagnostiky elektrických zařízení metod strukturální analýzy, a to zvláště díky jejich nesporným výhodám, k nimž patří větší vypovídací schopnost i vydatnost získaných informací a menší rozptyl výsledků. Jako příklad mohou posloužit termoanalytické metody - diferenční termická analýza – DTA, termomechanická analýza – TMA, termogravimetrie – TG. Velmi dobré uplatnění nacházejí nejen při určování stupně degradace elektroizolačních systémů.

## 4. PROUDOVODNÉ ČÁSTI

Postupně byly popsány metody od technické diagnostiky, přes diagnostiku silnoprůdových zařízení až k diagnostice samotných proudovodných drah přístrojů. Nejdříve je však nutné definovat, co to proudovodná dráha je a jaké požadavky jsou na ni kladeny, protože přesně ty jsou předmětem sledování při zjišťování technického stavu.

Jak už slovní spojení proudovodné části napovídá, jedná se o prvky vedoucí elektrický proud. U elektrických přístrojů řadíme do proudovodné dráhy svorky přístroje, spojovací komponenty a kontakty. Přejídnou částí proudovodné dráhy je i elektrický oblouk vznikající při spínání mezi kontakty některých prostých a výkonových vypínačů. Prvky tvořící proudovodnou dráhu jsou vystaveny tepelnému a mechanickému namáhání – viz. 4.1. a 4.2.

Zvlášť důležitou je pak také izolace. Základním materiálem bývá pevný izolant, který zajišťuje upevnění proudovodných částí, ale zároveň elektricky odděluje živé části. U spínacích přístrojů je však nutný pohyb, což může splňovat také kapalný nebo plyný izolant. Tyto izolanty, jak pevné, tak kapalné či plynné, jsou mezi vodivými částmi přístroje a zemí. Izolace tvořící toto rozhraní bývá nejslabším místem a vlivem zhoršené elektrické pevnosti může dojít až k poruše. [7]

### 4.1. Mechanické namáhání

Mechanické namáhání částí proudové dráhy je dáno jednak tahem pružin, nárazy kontaktů při zapínání, vlivy okolního prostředí, ale také vznikem elektrodynamických sil. [7] Průchodem elektrického proudu vodiči se generují v okolí vodičů magnetická pole, jejichž interakcí vznikají tyto proměnlivé síly, které jsou mnohdy nežádoucí, tudíž je snaha je potlačit, ale jsou i případy, kdy se naopak konstrukčními úpravami zvětšují. Velikost elektrodynamických sil je tedy závislá na protékajícím proudu a na intenzitě magnetických polí. Tato velikost lze obecně vypočítat dvěma způsoby [8]:

- 1) ze změny magnetické energie soustavy vodičů, kterými protéká proud
- 2) podle Biotova-Savartova-Laplaceova zákona.

Síla je úměrná velikosti náboje  $q$ , na který působí, a vektorovému součinu rychlosti náboje  $\mathbf{v}$  a magnetické indukce  $\mathbf{B}$  magnetického pole, v kterém se náboj pohybuje, viz Obr. 4-1 a):

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad [\text{N}; \text{C}; \text{m} \cdot \text{s}^{-1}; \text{T}] \quad (4.1)$$

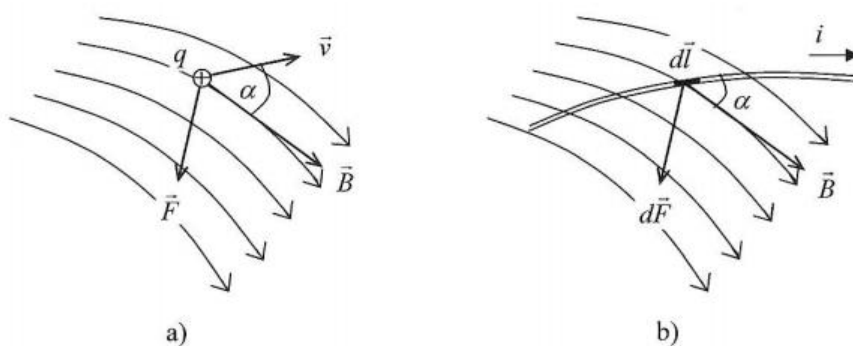
Přitom je směr síly kolmý na vektory  $\mathbf{v}$  a  $\mathbf{B}$  a orientaci je možné určit pravidlem pravé ruky. [8],[9]

Analogicky pak proud  $i$  protékající elementem  $d\mathbf{l}$  proudového vlákna nacházejícího se v magnetickém poli s indukcí  $\mathbf{B}$  (např. v magnetickém poli jiného vodiče, viz Obr. 4.2) působí elementární sílu  $d\mathbf{F}$ , což je vyjádřeno následujícím vztahem a názorně ukázáno na Obr. 4-1 b) a Obr. 4-2 [8],[9]:

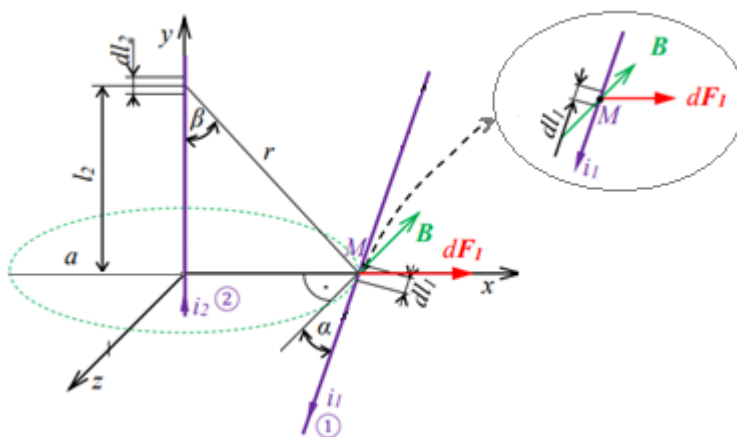
$$d\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad [\text{N}; \text{A}; \text{m}; \text{T}] \quad (4.2)$$

Na vodič délky  $l$  je pak síla  $F$  dána vztahem:

$$\mathbf{F} = i \int_l d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad [\text{N}; \text{A}; \text{m}; \text{T}] \quad (4.3)$$



Obrázek 4-1 Síly působící v magnetickém poli [7]



Obrázek 4-2 Síla vznikající interakcí s magnetickým polem vodiče 2 [8]

Jak už bylo řečeno, elektrodynamické síly vznikají interakcí magnetických polí a to je možno dle [7] v následujících případech:

- a) při vzájemném působení více proudových drah
- b) při zakřivené proudovodné dráze
- c) při proudovodné dráze blízké feromagnetickému rozhraní
- d) při změně průřezu proudovodné dráhy, která způsobí deformaci proudového pole
- e) při změně indukčnosti

## 4.2. Tepelné namáhání

Teplota proudových částí je dle [9] ovlivněna několika způsoby:

- a) vznikem tepla při průchodu proudu (Joulovy ztráty)
- b) předáváním tepla s ostatními částmi přístroje (přenos tepla vedením)
- c) podmínkami vnějšího chlazení
- d) střídavé elektromagnetické pole indukující vířivé proudy

další dodává také [8]

- e) dielektrické ztráty v izolantech
- f) teplo produkované elektrickým obloukem.

Teplo, které způsobuje elektrický oblouk je značné, působí však pouze krátkodobě a na blízké prvky, jako jsou kontakty a konstrukční materiály zhášecích komor.

Při dvou základních proudových namáháních (trvalým jmenovitým a krátkodobým zkratovým proudem) by měly být vodivé materiály plně využity a hlavně teplota by neměla přesáhnout dovolené hodnoty, to je nutné brát v úvahu při návrhu konstrukce elektrického přístroje. [9]

Průchodem proudu vodičem vznikají tepelné Joulovy ztráty  $dQ$ , které lze vyjádřit vztahem:

$$dQ = R \cdot I^2 \cdot dt \quad [J; \Omega; A; s] \quad (4.3)$$

Tyto ztráty se pak částečně odvádějí za stejnou dobu ochlazováním ( $\alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta \cdot dt$ ) a zbytek z tělesa neodchází, ale způsobuje jeho oteplení, tj. zvýšení teploty o  $d\vartheta$ , což je patrné z tzv. rovnice tepelné rovnováhy 4.4:

$$R \cdot I^2 \cdot dt = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta \cdot dt + c \cdot V \cdot d\vartheta, \quad (4.4)$$

[Ω; A; s; Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>; m<sup>2</sup>; K; s; Jm<sup>-3</sup>K<sup>-1</sup>; m<sup>3</sup>; K]

kde  $R$  je odpor vodiče,

$I$  elektrický proud procházející vodičem,

$dt$  časový okamžik, po který proud vodičem protéká,

$\alpha_0$  je součinitel přestupu tepla,

$A$  povrch úseku, který je ochlazován;

$\Delta\vartheta$  okamžité oteplení tělesa proti okolí,

$c$  objemová tepelná kapacita uvažovaného úseku

$V$  objem zmiňovaného úseku a

místo  $d(\Delta\vartheta)$  v rovnici (4.4) můžeme psát přírůstek teplot  $d\vartheta$ , protože první derivace oteplení podle času je stejná jako první derivace teploty podle času. [7]

### 4.2.1 Vznik tepla průchodem proudu

Vznik tepla ve vodiči průchodem proudu je nastíněn už výše, počítá se zde však s určitými zjednodušujícími předpoklady, např. odpor vodiče  $R$  (působením proudu a oteplení) se nemění, vodič je homogenní a má konstantní průřez, dále se pak také předpokládají koeficient přestupu tepla a měrná tepelná kapacita konstantní. [8]

Odpor  $R$  je však závislý na teplotě vodiče. Jako konstantu lze brát odpor pouze pro stacionární stav a malé rozsahy teplot. Chceme-li dosáhnout co nejpřesnějších výpočtů je nutností brát v potaz teplotní závislost činného odporu a v nestacionárním stavu i časovou. Výchozí diferenciální rovnice se tak změni na tvar:

$$dQ = [i(t)]^2 \cdot R(\vartheta) \cdot dt \quad [J; A; \Omega; s] \quad (4.5)$$

kde  $dQ$  jsou tepelné ztráty za velice krátký časový úsek,

$i(t)$  je elektrický proud závislý na čase,

$R(\vartheta)$  je elektrický odpor proměnný s teplotou a

$dt$  je sledovaný velice krátký časový okamžik.

Tato výchozí rovnice se však i nadále může lišit a to v závislosti na tom, zda vodičem prochází stejnosměrný či střídavý proud. Prochází-li stejnosměrný proud, činný odpor  $R$  homogenního vodiče je dán vztahem:



$$R = \varrho(\vartheta) \frac{l}{S} \quad [\Omega; \Omega m; m; m^2] \quad (4.6)$$

kde  $\varrho(\vartheta)$  je rezistivita teplotně závislá,  
 $l$  délka vodiče;  
 $S$  průřez vodiče. [9]

Při protékání střídavého proudu je situace opět trochu jiná, protože v tomto případě nastává nerovnoměrné rozložení hustoty proudu v jednotlivých místech průřezu vodiče, vlivem vlastního magnetického pole vodiče, popř. i cizího, velmi blízkého. Tento povrchový jev (skinefekt), kdy proudová hustota vzrůstá směrem k povrchu vodiče, rovněž přispívá, stejně jako teplota, ke zvětšování odporu, což lze v rov. 4.6 respektovat přidáním činitele povrchového zhuštění  $k_p$  a činitelem jevu blízkosti  $k_{bl}$ :

$$R = \varrho(\vartheta) \cdot \frac{l}{S} \cdot k_p \cdot k_{bl} \quad [\Omega; \Omega m; m; m^2; -, -] \quad (4.7)$$

Tyto dva činitele  $k_p$  a  $k_{bl}$  rostou s frekvencí  $f$ , permeabilitou prostředí  $\mu$ , elektrickou vodivostí a průřezem vodiče  $S$ . [7],[9]

## 4.2.2 Teplo vznikající na kontaktech

Místním zdrojem tepla jsou také kontakty. Oteplení kontaktů má totiž značný vliv při tvorbě kysličníkové vrstvy, což způsobuje zvětšování přechodového odporu. To znamená větší ztrátu energie na přechodu následovanou ještě dalším zvýšením teploty nejen na kontaktech, ale také na navazujících částích přístroje. [9]

### 4.2.2.1 Přechodový odpor

Podle [8] lze přechodový (tj. stykový)  $R_s$  odpor považovat za hlavní ukazatel jakosti elektrických kontaktů, které patří k nejvýznamnějším zdrojům tepla v přístrojích.

Přechodový odpor ve styku je tvořen dvěma složkami. Jednak odporem úžinovým  $R_u$ , který vzniká jako důsledek nedokonalosti styku celé plochy kontaktu, ale styku pouze v mikroploškách, jejichž počet je čistě náhodný, závislý na mechanických vlastnostech materiálů a velikosti přitlačné síly  $F_k$ . Další zvětšení stykového odporu způsobují cizí vrstvy, které jsou chemického (např. oxidy) nebo mechanického původu (např. nečistoty). Odporem cizích vrstev  $R_w$  se pak rozumí odpor, který způsobují tyto vrstvy [7]. Obecně jde tedy o součet těchto dvou složek, což vyjadřuje následující vztah:

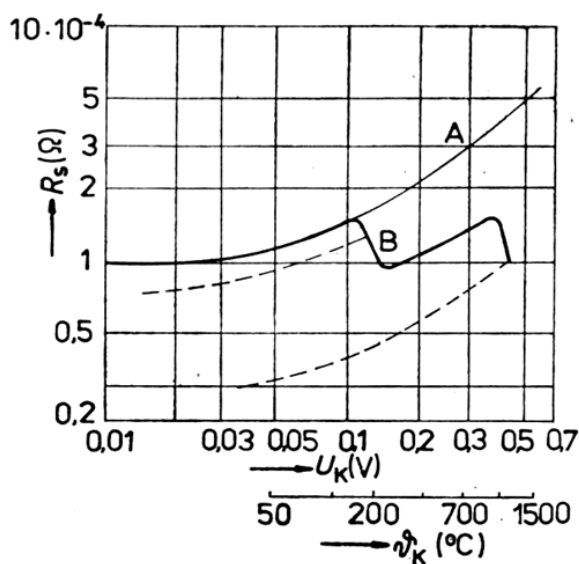
$$R_s = R_u + R_w \quad [\Omega; \Omega; \Omega] \quad (4.8)$$

Je však velice složité vyčíslit přesně odpor ve styku, a v konstrukční praxi se využívá empirického vztahu 4.9:

$$R_s = k_n / \left(\frac{F_k}{F_1}\right)^n \quad [\Omega; \Omega; N; N] \quad (4.9)$$

kde  $R_s$  je stykový odpor;  
 $k_n$  činitel zachycující druh materiálu a vliv cizích vrstev;  
 $F_k$  přítlačná síla  
 $F_1$  síla 1 N a  
 $n$  činitel udávající druh kontaktního styku (bodový, přímkový, plošný).

Odpor  $R_s$  je tak závislý na přítlačné síle  $F_k$ , ale také na teplotě či úbytku napětí na styku. Zvětšuje se s rostoucí teplotou, dokud nedojde k měknutí kontaktů, čímž se zmenší stykový odpor. Avšak následuje-li další zvyšování teploty, zvětšuje se i stykový odpor až do natavení a svaření kontaktů. Tato teplotní, ale také závislost na úbytku napětí ve styku je patrné z Obr. 4-3. [8]



Obrázek 4-3 Závislost odporu  $R_s$  na úbytku napětí a teplotě ve styku - měď [8]

## 5. MĚŘENÍ PŘECHODOVÉHO ODPORU

V předchozí kapitole byl popsán vliv přechodového odporu na kvalitu proudovodné dráhy a principy jeho vzniku. Velký přechodový odpor znamená větší ztráty energie na kontaktech a dále pak možné zvyšování teploty v místě styku a vyšší pravděpodobnost poškození části přístroje.

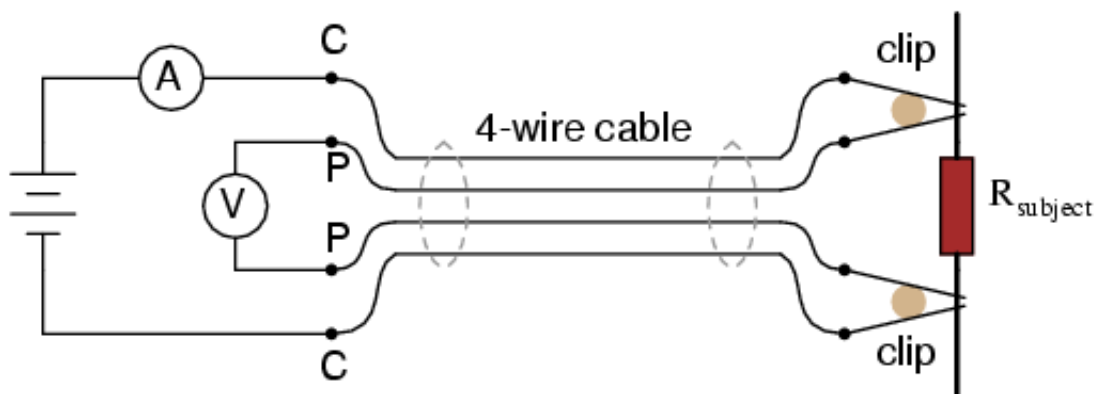
Správné určení přechodového odporu je tedy prvním bodem při navrhování kontaktního ústrojí [7]. V rámci diagnostiky pak může posloužit jako predikce případných problémových kontaktních spojení, které mohou být způsobeny určitou mírou poškození kontaktu, jako jsou rýhy, nečistoty a jiné druhy nerovností, či nevhodnou velikostí přitlačné síly. To vše může vést k většímu přechodovému odporu a větším ztrátám při připojení přístroje k síti.

Měření přechodového odporu je možné v podstatě dvěma způsoby:

- 1) dvouvodičově
- 2) čtyřvodičově

Ad 1) Dvouvodičové metody (přímé metody, substituční, můstkové) jsou však při měření velmi malých odporů zatíženy velkými chybami měření, které mohou být řádově stejné či dokonce vyšší než sama měřená hodnota. Tyto nezanedbatelné nepřesnosti jsou způsobeny zejména vlivem odporu přívodních vodičů. [10]

Ad 2) Pro správné měření je tak nutno se pokusit tyto nepříznivé vlivy eliminovat, což umožňuje čtyřvodičová (= Kelvinova) nepřímá metoda měření odporu, která je znázorněna na Obr. 5-1.



Obrázek 5-1 Čtyřvodičová (Kelvinova) metoda měření odporu [10]

Při této metodě je nutné použít jak voltmetr, tak ampérmetr. Princip metody pak spočívá v přivedení proudu dvěma vodiči (C) k měřenému objektu, např. kontaktu, a měření úbytku napětí voltmetrem, který je připojen přímo k měřenému objektu pomocí dalších dvou vodičů (P), což by se mohl jevit jako další problém skrze chybné měření napětí přes dlouhý pár (odporových) vodičů a dopouštět se stejné chyby jako u dvouvodičové metody. Tomu však brání fakt, že voltmetr má velký vstupní odpor a proto jím prochází minimální proud, který nezpůsobuje téměř žádný úbytek napětí a voltmetr tak ukazuje velmi přesnou hodnotu napětí přímo na měřeném objektu. Výsledný přechodový odpor se spočítá jako poměr těchto naměřených hodnot:

$$R_s = \frac{U_s}{I} \quad [\Omega; V; A] \quad (5.1)$$

kde  $R_s$  je přechodový odpor,  
 $U_s$  úbytek napětí a  
 $I$  proud procházející měřeným objektem. [10]

## 6. MĚŘENÍ TEPLOT

Teplota je v podstatě míra kinetické energie pohybu molekul a atomů, při kterém je jejich rychlost proměnná v čase, a dochází k jejich vzájemným srážkám. V pevných skupenstvích se jedná o kmitavý pohyb kolem rovnovážné polohy. Určování teploty se však neděje přímo, ale pomocí teplotních závislostí jiných fyzikálních veličin, které lze vyjádřit na teplotní stupnici.

Protože existuje jen málo látek nezávislých na teplotě, je znalost teploty potřebná v drtivé většině oblastí lidského působení, diagnostiku silnoproudých zařízení nevyjímaje. [11]

Důležitým aspektem je pak i přesnost měření teploty, která je ovlivněna mnoha faktory. Základním a velmi důležitým je volba měřicího zařízení a metody. Globálně lze metody měření teplot rozdělit na dotykové a bezdotykové.

### 6.1. Dotykové měření teplot

Dotykové měření teplot je charakteristické přímým kontaktem mezi snímačem a objektem, na kterém se provádí měření. Měření je tak umožněno přenosem tepla vedením.

Společnými nevýhodami dotykových měření jsou tyto:

- a) snímač ovlivňuje okamžitou teplotu v měřeném teplotním poli přivedením nebo odvedením tepla,
- b) možný teplotní spád mezi snímačem a proudícím měřeným prostředím,
- c) opožděná reakce měření při měření teplotně nestacionárních objektů. [12]

Výhodně lze tedy dotykové měření teploty využít pro diagnostiku teplotně i mechanicky stacionárních a dobře dostupných objektů. Výhodou jsou většinou i menší pořizovací náklady ve srovnání s bezdotykovými metodami.

Pro zvýšení efektivnosti dotykových senzorů teplot může posloužit jejich zabudování do samotného měřené přístroje. Při zabudování se však musí dbát na potlačení výše zmíněných nevýhod, u tuhých těles pak zvláště na minimalizaci tepelného odporu mezi senzorem a povrchem měřeného objektu. Lepší využití přináší zabudování senzoru uvnitř diagnostikovaného tělesa už během montáže, kde jsou vhodnými teploměry např. plášťové termoelektrické články s izolovaným spojením. [11]

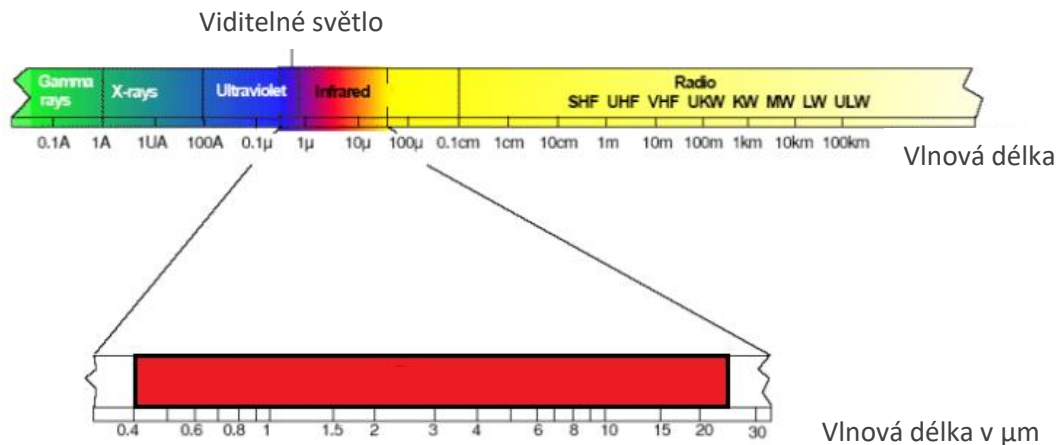
V následující Tab. 6-1 je přehled používaných technických teploměrů pro dotykové měření teplot s principem určení teploty (tj. jaká teplotně závislá veličina je sledována) a také rozsah použitelnosti jednotlivých snímačů. Rozsahy jsou však pouze orientační, protože se mohou lišit v závislosti na použitých materiálech.

**Tabulka 6-1 Přehled dotykových senzorů teplot [11],[13],[14]**

Skupina teploměrů	Typ teploměru	Fyzikální princip	Teplotní rozsah (°C)	
dilatační teploměry	plynové tlakové	změna tlaku	-250	800
	parní tlakové	změna tlaku nasycených par	-40	230
	kapalinové tlakové	změna objemu	-30	500
	bimetalové	délková roztažnost	0	400
	skleněné	objemová roztažnost ve skle	-190	600
	tyčové	délková roztažnost	0	1000
elektrické teploměry	termoelektrické	termoelektrický jev	-200	1700
	odporové kovové	změna elektrického odporu kovu	-250	1000
	odporové polovodičové	změna elektrického odporu	-200	400
	Polovodičové s PN přechodem	napětí PN přechodu v propustném směru	-55	150
indikátory teploty	keramické žároměrky	bod měknutí	600	2000
	tavné indikátory	bod tání	40	1400
	teploměrné barvy	změna barvy	40	1350
speciální senzory	akustické	rychlost šíření zvuku	750	3000
	šumové	tepelný šum	-270	830
	magnetické	magnetická susceptibilita paramag. solí	-270	-190
	krystalové	rezonanční kmitočet křemen. výbrusu	-80	250

## 6.2. Bezdotykové měření teplot

Infračervená pyrometrie, jak bývá také označováno bezdotykové měření teploty, je měření povrchové teploty objektů bez přímého kontaktu a hlavně na principu snímání tělesem vysílaného elektromagnetického záření o vlnové délce od 0,4  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$ , tzn. zahrnuje i část viditelného spektra. Na Obr. 6-1 jsou vlnové délky elektromagnetického záření, červeně je vyznačen rozsah vlnových délek využívaných k měření. Záření od 2  $\mu\text{m}$  do 25  $\mu\text{m}$  (oblast krátkovlnného, středovlnného a dlouhovlnného infračerveného spektra) je nazýváno tepelným zářením. [11]



**Obrázek 6-1 Vlnové délky elektromagnetického záření [15]**

Bezdotyková měření mají nesporné výhody, ale i několik nevýhod, jak je popsáno níže.

Výhody:

- zanedbatelný vliv senzorů na měřený objekt
- možné měření teploty na nestacionárních (pohybujících se) objektech
- bezpečný odstup od měřeného objektu (např. u zařízení vysokého napětí aj.)
- schopnost rychle reagovat na změny teplot
- možnost teplotně zpracovávat teploty celých pracovních ploch těles (termografie, termovize)
- možnost online diagnostiky při chodu zařízení

Nevýhodami jsou nejistoty měření způsobeny:

- neznalostí hodnoty emisivity jednotlivých částí přístroje
- neznalostí prostupnosti prostoru mezi měřícím čidlem a měřeným objektem
- špatnou korekcí nežádoucího záření způsobeného odrazy [11]

Základní dělení senzorů tepelného záření je dle interakce fotonů s materiálem na tepelné a kvantové.

- Tepelné senzory pracují na principu oteplení citlivé části detektoru po absorbování fotonu a poté nepřímém vyhodnocení pohlcené energie pomocí snímače teplot. Praktické využití mají termoelektrické, bolometrické a pyroelektrické tepelné detektory.
- Oproti tomu kvantové senzory pracují na principu fyzikálních jevů, které vznikají při přímém vzájemném působení fotonů, jež dopadají na povrch senzoru. Fotodiody, používané při této metodě měření, bývají obvykle ve fotonapětřovém režimu. Použití kvantových senzorů je při termovizním záznamu, podobně jako pyroelektrické. [13]

V Tab. 6-2 jsou uvedeny některé typy pyrometrů a metod bezdotykového měření teplot. Uvedené jsou stručně i principy.

**Tabulka 6-2 Přehled bezdotykového měření teplot [11]**

Skupina senzorů	Typ teploměru	Fyzikální princip
bezdotykové teploměry	úhrnné pyrometry	vyhodnocení tepelného záření v celém spektru vlnových délek
	monochromatické pyr.	závislost spektrálního vyzařování při dané vlnové délce na teplotě
	pásmové pyrometry	záření v úzkém pásmu vlnových délek
	poměrové pyrometry	poměr dvou září při dvou různých vlnových délkách
	termovize	snímání teplotního obrazu tělesa

### 6.2.1 Teoretické základy

Černé těleso je definováno jako idealizované těleso, které bez závislosti na úhlu dopadu záření, vlnové délce i použitém materiálu dokonale pohlcuje i vyzařuje energii – žádné záření neodráží ani nepropouští. Platí, že celkové množství energie vyzařené povrchem černého tělesa za jednotku času a rozložení intenzity záření podle vlnových délek závisí pouze na jeho teplotě.

Záření černého tělesa popisují zákony: Planckův vyzařovací zákon, Stefan-Boltzmannův zákon a Wienův posunovací zákon. [16]



### 6.2.1.1 Planckův vyzařovací zákon

Německý fyzik Max Planck položil základy kvantové mechaniky, zavedením svého postulátu o kvantování elektromagnetické energie totiž odvodil kvantový zákon vyzařování černého tělesa. Planckův zákon vysvětluje rozdělení emitované energie pro určitou teplotu černého tělesa jako funkci vlnové délky tepelného záření. [16] Možný tvar tohoto zákona je dle [14]:

$$H_{0\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}; \text{W} \cdot \text{m}^{-2}; \text{m}; \text{m} \cdot \text{K}; \text{m}; \text{K}] \quad (6.1)$$

kde  $H_{0\lambda}(\lambda, T)$  je spektrální hustota intenzity vyzařování závislá na vlnové délce  $\lambda$  a teplotě  $T$ ,

$\lambda$  vlnová délka,

$T$  teplota,

$c_1$  první radiační konstanta dána vztahem:

$$c_1 = 2\pi h c^2 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}; \text{J} \cdot \text{s}; \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.2)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta,

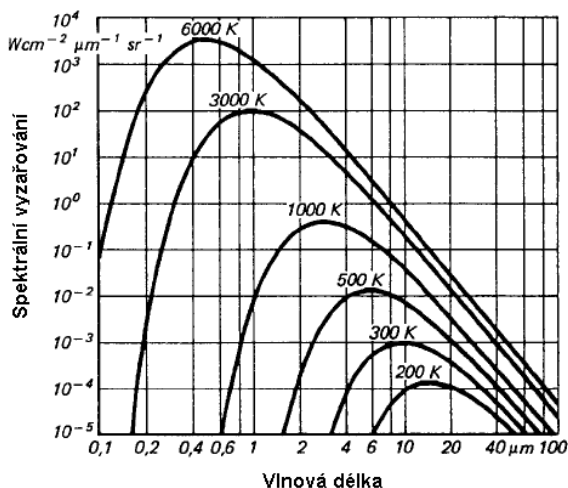
$c$  rychlost světla ve vakuu a

$c_2$  druhá radiační konstanta definována jako:

$$c_2 = \frac{h \cdot c}{k} \quad [\text{m} \cdot \text{K}; \text{J} \cdot \text{s}; \text{m} \cdot \text{s}^{-1}; \text{J} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (6.3)$$

kde  $k$  je Boltzmannova konstanta.

Příklad grafického vyjádření Planckova zákona pro pět různých teplot černého tělesa je znázorněno na Obr. 6-2.



Obrázek 6-2 Vyzařovací charakteristiky černého tělesa [15]

### 6.2.1.2 Wienův posunovací zákon

Wienův posunovací zákon vyjadřuje vztah mezi vlnovou délkou záření  $\lambda_{max}$  a teplotou černého tělesa  $T$  v maximu spektrální vyzařovací charakteristiky:

$$\lambda_{max} = \frac{c_3}{T} = \frac{2897,8}{T} \quad [\text{m}; \text{m}\cdot\text{K}; \text{K}] \quad (6.4)$$

kde  $c_3$  je třetí radiační konstanta.

Vlnová délka maxima vyzařování černého tělesa je tedy nepřímo úměrné jeho absolutní teplotě, což lze vidět na Obr. 6-2, kde se s rostoucí teplotou hodnota spektrální hustoty intenzity vyzařování posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám. [16]

### 6.2.1.3 Stefan-Boltzmannův zákon

Stefan-Boltzmannův zákon vyjadřuje základní vlastnost dokonale černého tělesa, že jeho intenzita vyzařování závisí pouze na jeho teplotě:

$$H_0 = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}; \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}; \text{K}] \quad (6.5)$$

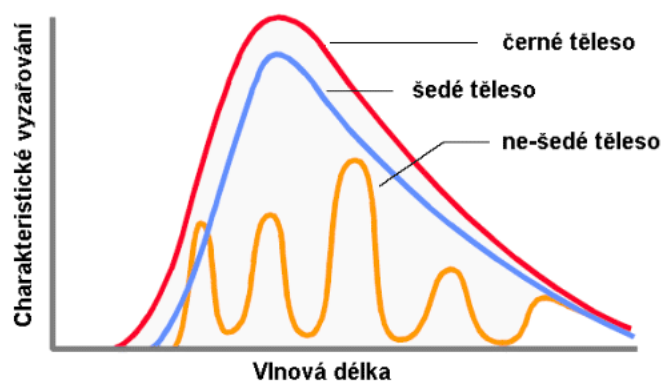
kde  $H_0$  je intenzita vyzařování dokonale černého tělesa,  
 $T$  absolutní teplota a  
 $\sigma$  Stefan-Boltzmannova konstanta [14].

## 6.2.2 Emisivita a její určování

Teoretické základy popsány výše braly vždy v úvahu idealizované dokonale černé těleso, oproti tomu reálná tělesa vyzařují i pohlcují méně. Poměr mezi intenzitou vyzařování objektem při dané teplotě a dané vlnové délce  $H_e(T, \lambda)$  k intenzitě vyzařování černým tělesem při stejné teplotě a vlnové délce  $H_{e0}(T, \lambda)$ , pak udává poměrnou zářivost, tzv. emisivitu  $\varepsilon(T, \lambda)$ :

$$\frac{H_e(T, \lambda)}{H_{e0}(T, \lambda)} = \varepsilon(T, \lambda) \leq 1 \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}; \text{W}\cdot\text{m}^{-2}; -] \quad (6.6)$$

Koeficient černosti, jak bývá emisivita taktéž označována, je veličina menší než 1, závisí na teplotě, opracování povrchu a vlnové délce. [17] Materiály, které mají pro různé vlnové délky rozdílné hodnoty emisivity, mají rovněž různé velké odchylky od záření černého tělesa. Takové materiály se nazývají selektivní či spektrální zářiče (ne-šedá tělesa). Odlišná jsou tělesa šedá, jejichž emisivitu lze považovat za konstantní. [16] Obr. 6-3 ukazuje srovnání charakteristického vyzařování různých těles.



**Obrázek 6-3 Charakteristické vyzařování těles o různých emisivitách [15]**

Při bezkontaktním měření teplot metodami snímající infračervené záření je emisivita brána jako základní korekční faktor, jenž umožňuje přepočtem z radiační teploty  $T_R$  určit skutečnou termodynamickou teplotu  $T$ . Správným nastavením emisivity se respektuje i fakt, že čidlo měřicího přístroje přijímá nejen emitované, ale také odražené, případně měřeným objektem prošlé záření.

Metody určení emisivity:

- 1) Pro často používané materiály lze emisivitu stanovit z tabulek, jedná se však o hodnotu pouze orientační, protože skutečnou hodnotu emisivity významně ovlivňují různé povrchové úpravy, nečistoty či míra oxidace, viz Tab. 6-3, kde bylo vybráno několik materiálů o různých emisivitách. Tabulky emisivity rovněž napomáhají s volbou vhodného měřicího přístroje, protože udávají také správný rozsah vlnových délek pro dané materiály. [15]

**Tabulka 6-3 Emisivita vybraných materiálů [11]**

materiál	povrch	1 $\mu\text{m}$	1,6 $\mu\text{m}$	8 $\mu\text{m}$ - 14 $\mu\text{m}$
hliník	nezoxidovaný	0,1 - 0,2	0,02 - 0,2	-
	zoxidovaný	0,4	0,4	0,2 - 0,4
nikl	zoxidovaný	0,5-0,9	0,4-0,7	0,2-0,5
	elektrolytický	0,02-0,04	0,1-0,3	-
železo	oxidovaný	0,4 - 0,8	0,5 - 0,9	0,5 - 0,9
	nezoxidovaný	0,35	0,1 - 0,3	-
	korodovaný	-	0,6 - 0,9	0,5 - 0,7
měď	roztavený	0,35	0,4 - 0,6	-
	lesklý	-	0,03	-
	drsňý	-	0,05 - 0,2	-
	zoxidovaný	0,2 - 0,8	0,2 - 0,9	0,4 - 0,8

- 2) Jiné určení emisivity je možné změřením teploty dotykovým senzorem, poté se stejné místo zaměří bezdotykově. Při bezdotykovém měření je postupně měněna emisivita až do hodnoty, kdy se obě změřené teploty rovnají.
- 3) Další metoda spočívá v zabarvení části povrchu materiálu barvou, nejčastěji černou, o známé emisivitě. Bezdotykově se změří nejprve teplota na začerněném místě, pak mimo toto místo. Ke zjištění správné emisivity dojde stejným způsobem jako v předchozí metodě.
- 4) Je-li možnost do objektu vyvrtat otvor o hloubce alespoň 6x větší než je jeho průměr, lze za předpokladu stejné teploty uvnitř otvoru a objektu určit hodnotu emisivity. Otvor totiž splňuje představu černého tělesa -  $\varepsilon = 1$ , postup zjištění správného koeficientu černosti se potom shoduje s případy uvedenými v 2) a 3).
- 5) Dále může být emisivita vzorku změřena spektrometrem. [11]

### 6.2.3 Termografie

Termografie jsou systémy využívající plošné snímání teplotních polí. Rozdělení je možné na systémy bez nebo s rozkladem obrazu. Systémy bez rozkladu obrazu fungují na principu optikou vytvořeného tepelného obrazu na fotokatodě. Princip lze zjednodušeně popsat tak, že při ozáření fotokatody se z ní emitují elektrony, jejichž tok zesiluje fotonásobič a usměrňovačem je namířen na stínítko, kde se vytvoří obraz. Tato metoda je však omezena na maximálně 1  $\mu\text{m}$  vlnové délky. [11],[13]

Systémy s rozkladem obrazu jsou označovány jako termovize [11].

### 6.2.4 Termovize

Termovizní systémy lze dále rozdělit na systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu a systémy s maticovým detektorem. U opticko-mechanického rozkladu se dráha rozkladu provádí pomocí pohyblivých zrcadel a otočných hranolů. Výroba těchto systémů pro civilní účely se však ukončila a využívány jsou tak pouze systémy s maticovým detektorem. Konkrétněji chlazené a nechlazené maticové mikrobolometrické a kvantové FPA detektory (1D-řádkové a 2D-plošné). Chlazení zajišťuje hermeticky uzavřená chladicí soustava se dvěma písty s plynným heliem, fungující na bázi kompresorové mikrochladičky (Stirlingův chladič), nebo častěji

levnější termoelektrický chladič (Peltierův článek). Samotné zpracování pak provádí čip díky multiplexeru a A/D převodníkům v každém řádku matice. [11]

Na Obr. 6-4 a Obr. 6-5 jsou kamery, pomocí kterých byla provedena diagnostická měření v této bakalářské práci. Pro možnost porovnání poté slouží parametry těchto kamer v Tab. 6-3 a Tab. 6-4, odlišnosti jsou patrné zvláště v citlivosti měření, možnosti záznamu videa, komunikačních rozhraních a rozměrech kamery.



**Obrázek 6-4 Termokamera SAT-HY 6800**



**Obrázek 6-5 Termokamera FLIR E95 [18]**

Obecně je termovize základní a velice důležitou metodou při infračervené diagnostice, protože díky ní lze kontrolovat funkce přístrojů, při jejichž činnosti může docházet k tepelnému namáhání. Může upozornit např. na materiálové vady, opotřebení, dále může sledovat stavy vnitřních částí zařízení. Vyhodnocení vychází ze snímků pořízených termovizní kamerou – termogramů, na kterých jsou určité části měřeného objektu zobrazeny různými barvami, které jsou uměle přiřazeny různým teplotám, protože termovize pracuje v části spektra s neviditelným zářením.

Detekovat lze i vnitřní defekty materiálu. Slouží k tomu pulzní termografie, pracující na principu ozařování šetřeného zařízení vnějšími tepelnými stimulačními pulzy a následném snímání teploty povrchu termovizní kamerou. Druhou metodou je lock-in termografie využívající modulaci tepelného toku, který se uvnitř materiálu při změně prostředí (defektu) odráží zpět k povrchu a interferuje s primárním zářením. Fourierovou rychlou transformací se pak zpracovávají snímky získané termovizní kamerou. Tímto způsobem lze určit teploty do určité hloubky pod povrchem. [11]

**Tabulka 6-4 Technické parametry SAT-HY 6800 [19]**

<b>Detektor</b>	typ	nechlazený FPA mikrobolometr
	spektrální rozsah	8-14 $\mu\text{m}$
	rozlišení	320 x 240 bodů
<b>Pracovní prostředí</b>	provozní teplota	-20 až +50 °C
	vibrace	2 G
	náraz	25 G
	krytí	IP 54
<b>Měření</b>	teplotní rozsah	-40 až +2000 °C
	citlivost	0,08 °C
	přesnost	$\pm 2$ °C nebo $\pm 2$ % z měřeného rozsahu
	min. zaostřovací vzdálenost	0,5 m

**Tabulka 6-5 Technické parametry FLIR E95 [18]**

<b>Detektor</b>	typ	nechlazený mikrobolometr
	spektrální rozsah	7,5-14 $\mu\text{m}$
	rozlišení	464 x 348 bodů
<b>Pracovní prostředí</b>	provozní teplota	-15°C až +50 °C
	vibrace	2 G
	náraz	25 G
	krytí	IP 54
<b>Měření</b>	teplotní rozsah	-20 až +1500 °C
	citlivost	0,03 °C
	přesnost	$\pm 2$ °C nebo $\pm 2$ % z měřeného rozsahu
	min. zaostřovací vzdálenost	0,5 m (pro obektiv 18 mm)
<b>Ukládání dat</b>	Formát dat	Radiometrické JPEG
<b>Záznam a streaming videa</b>	Záznam radiometrického videa	Ano, na SD kartu
	Streaming neradiometrického videa	Ano, přes UVC nebo Wifi

## 7. TEPLOTNÍ DIAGNOSTIKA

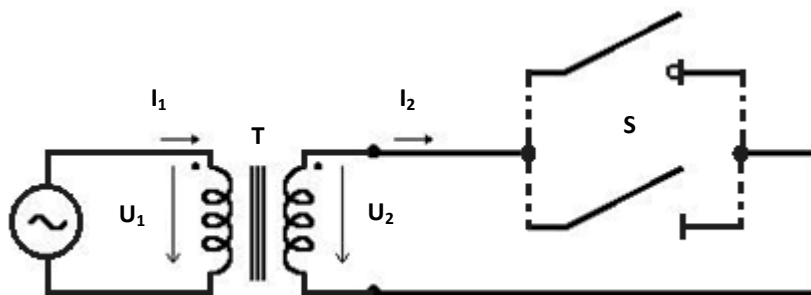
### 7.1. Úvod do měření

V této kapitole bude popsáno a zaznamenáno vlastní praktické využití diagnostiky pomocí termovizních systémů. Měření byla provedena v laboratořích Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií a to na dvou přístrojích od firmy IVEP, a.s.

První z měřených přístrojů byl odpínač typu CUB.S2.25.400.S...V1a. S odpínači je možnost se běžně setkat v rozvodnách VN. Při všeobecném rozdělení spínacích přístrojů lze odpínače zařadit do skupiny spínačů s omezenou spínací schopností. Vypíná pouze proudy provozní a jenom pokud je k tomu dán popud [8]. Odpínač tak v sobě spojuje funkci vypínače zátěže a zároveň odpojovací funkci, protože v rozpojeném stavu splňuje izolační vzdálenosti dané odpojovačům [9].

Druhý diagnostikovaný objekt byl právě vnitřní odpojovač typu QAK 12.400.25/1.P.R.-.-200/3.. Na rozdíl od odpínače má velmi nízkou spínací schopnost a slouží ke spojení či rozpojení nezátíženého elektrického obvodu s viditelnou rozpojovací dráhou. V rozvodech vysokého napětí až zvláště vysokého napětí se odpojovače používají, často v sérii s vypínačem, k viditelnému odpojení elektrického obvodu tak, aby bylo možno provést revizi či opravu a nevzniklo nebezpečí úrazu osobám provádějící revizní práce. [7]

Zapojení těchto přístrojů do obvodu principiálně odpovídá Obr. 7-1, kde hodnota jmenovitého proudu v měřeném obvodu byla kontrolována po celou dobu měření digitálními multimetry, v případě odpínače (označení S1) multimetrem B35T<sup>+</sup>, u odpojovače (označení S2) Hexagon 340A.



Obrázek 7-1 Schéma zapojení pro diagnostikované přístroje

Přístroje použité při měření odpínače jsou zpracovány v Tab. 7-1 v horní polovině, ve spodní pak při měření na odpojovači. Mikroohmmetr CROPICO DO5001 byl použit k určení přechodových odporů v obou případech.

**Tabulka 7-1 Přehled přístrojů užitých při diagnostice**

Označení	Přístroj	Typ	Výrobní/ evidenční číslo	Poznámka
S1	odpínač	CUB S2.25.400.S...V1a	P7-VUT	$U_r = 25 \text{ kV}$ , $U_p = 125 \text{ kV}$ , $I_r = 400 \text{ A}$ , $I_k = 20 \text{ kA}$ , $I_p = 50 \text{ kA}$
T1	regulovaný transformátor	TVB U 168.75/107	2457/2000	$U_1 = 230\text{-}250 \text{ V}$ , $S = 3,3 \text{ kVA}$
	dig. multimetr	B35T <sup>+</sup>	1000275281	1000V, CAT III
	převodník klešťový	C 103	1000139373	1000 V, CAT III
	mikroohmmetr	DO5001	24E-0405	
	termovizní kamera	SAT-HY6800	68010273	Rozsah teplot: -40 - +2000 °C
	2xkabel			$S = 500 \text{ mm}^2$
	dotykový teploměr	TMD-50	1000253047	Thermocouple K-type
S2	odpojovač	QAK 12.400.25/1.P.R.- .-.200/3	12-095	$U_r = 12 \text{ kV}$ , $I_r = 400 \text{ A}$ , $I_k = 25 \text{ kA}$
T2	regulovaný transformátor	CTR 2	100112	$U_1 = 230 \text{ V}$ , $P = 3600 \text{ W}$
	dig. multimetr	Hexagon 340A	1000216820	600V, CAT II
	proudový klešťový adaptér	A 050	1000213337	600 V, CAT III
	termovizní kamera	FLIR E95	78505197	Rozsah teplot: -20 - +1500 °C
	4xkabel			$S = 500 \text{ mm}^2$
	dotykový teploměr	THERM 2420	1000241794	



## 7.2. Měření na odpínači CUB S2.25.400.S...V1a

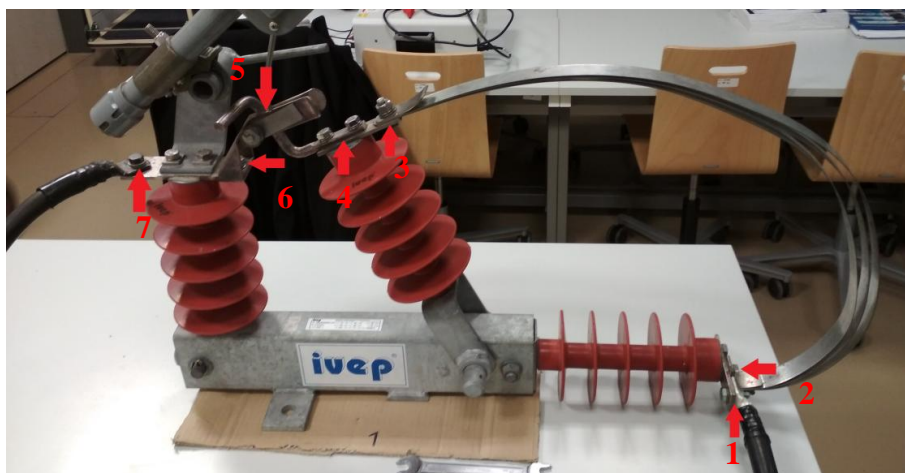
Před samotným zapojením odpínače do elektrického obvodu byly změřeny přechodové odpory na všech kontaktech proudové dráhy. Až poté byl přístroj zapojen do elektrického obvodu dle Obr. 7-1. Proud obvodem byl pomocí transformátoru nastaven na jmenovitou hodnotu 400 A s tolerancí +2 %. Vlastní měření teplot pomocí termovizní kamery probíhalo po dobu 1 hodiny při konstantním proudu. Pro správné vyhodnocení oteplení částí přístroje byly po uplynutí doby měření, za tepla, pomocí dotykového teploměru změřeny teploty jednotlivých částí obvodu, vždy zároveň s termovizním snímkem pro určení emisivity materiálů.

### 7.2.1 Měření přechodového odporu

Jak bylo psáno v části 4.2.2., místním významným zdrojem tepla jsou kontakty. Ukazatelem kvality kontaktu je právě přechodový odpor. Změřením přechodového odporu před zapojením odpínače do obvodu tak lze určit kontakty, na kterých by mohlo docházet k velkým ztrátám energie, zahřívání kontaktů a případným nevratným defektům přístroje. Jde tak o predikci chování kontaktů po připojení zařízení do obvodu, díky které je možné zabránit použití vadného kontaktu/přístroje.

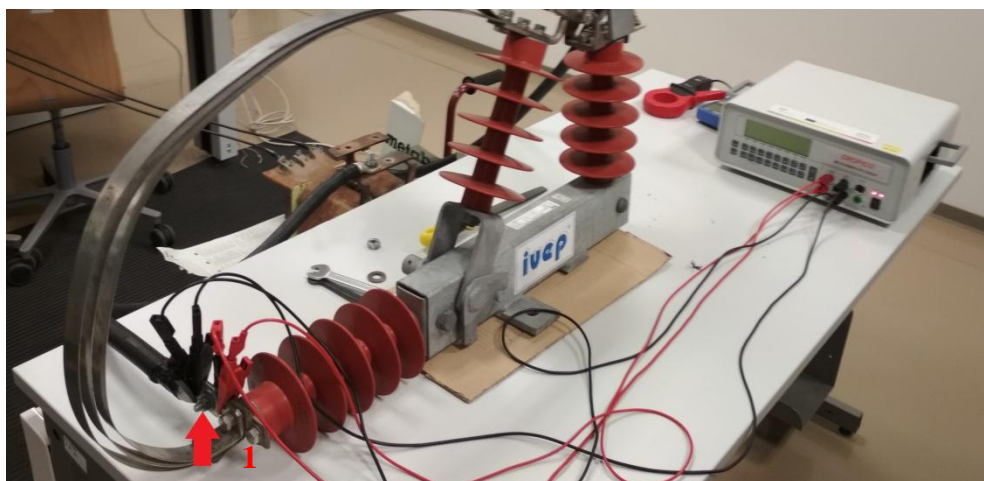
Pro měření přechodového odporu byl použit mikroohmmetr DO5001 od firmy CROPICO, který je určen pro měření malých odporů. Je také přizpůsoben měření pomocí čtyřvodičové Kelvinovy metody – vstupy pro dvě proudové i napěťové svorky.

Napěťové svorky byly postupně připojovány do těsné blízkosti všech kontaktů proudové dráhy, což je vidět na Obr. 7-2, kde je naznačeno číslování kontaktů.



Obrázek 7-2 Kontakty proudovodné dráhy odpínače

Měření vždy probíhalo tak, že po připojení proudových a napěťových svorek do blízkosti jednoho z kontaktů byl zapnut mikroohmmetr, který pomocí proudových svorek přivedl do měřeného místa proud o velikosti 10 A. Pomocí napěťových svorek na daném místě změřil úbytek napětí a přechodový odpor, jehož hodnotu přímo zobrazuje na displeji, je spočítán podle již známé Rov. 5.1. Schéma zapojení principiálně odpovídá Obr. 5-1, reálné provedení je ukázáno na Obr. 7-3, kde je znázorněno měření přechodového odporu na kontaktu 1 – oko přívodního kabelu-vstupní praporec.



**Obrázek 7-3 Měření přechodového odporu**

Výsledky takto provedených měření na všech kontaktech proudovodné dráhy odpínače jsou shrnuty v Tab. 7-2, kde je dopočítán i úbytek napětí, který odpovídal jednotlivému přechodovému odporu.

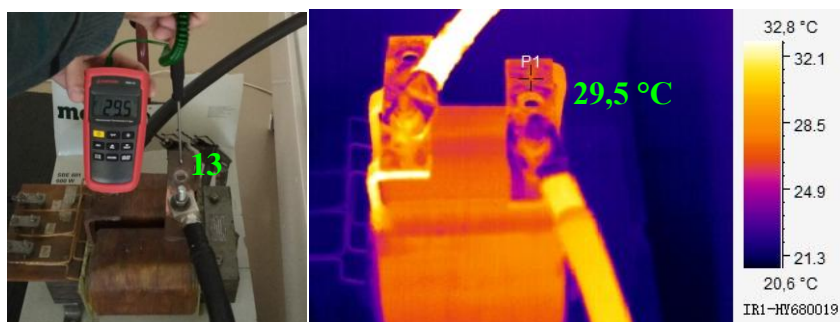
**Tabulka 7-2 Naměřené hodnoty přechodových odporů**

		<b>Rs [<math>\mu\Omega</math>]</b>	<b>I [A]</b>	<b>Us [mV]</b>
1	kabel - vstupní praporec	3,8	10,0	0,038
2	praporec - připojovací pás	38,3	10,0	0,383
3	připojovací pás - pohyblivý kontakt	14,8	10,0	0,148
4	spoj na pohyblivém kontaktu	7,2	10,0	0,072
5	pohyblivý - pevný kontakt	21,5	10,0	0,215
6	pevný kontakt - výstupní praporec	7,6	10,0	0,076
7	výstupní praporec - kabel	8,2	10,0	0,082

### 7.2.2 Určení emisivity materiálu

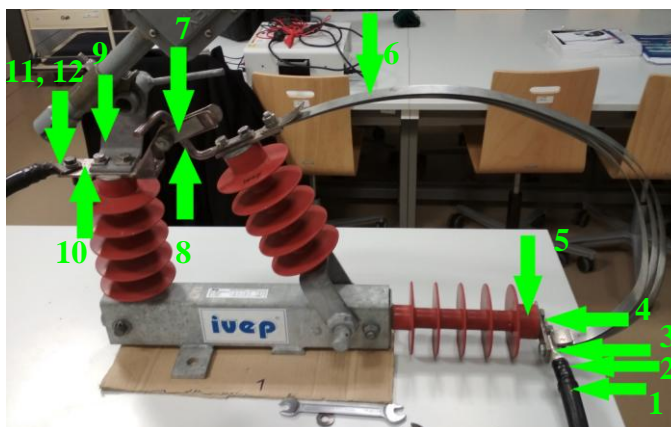
Je-li měřený objekt, stejně jako odpínač, složen z částí o různých materiálech a také různých povrchových úprav, musí se stanovit emisivita pro každý materiál zvlášť.

Při provádění diagnostiky odpínače v rámci této bakalářské práce byla použita metoda s použitím referenčního teploměru, kdy byla pomocí referenčního dotykového teploměru AMPROBE TMD-50 změřena teplota jednotlivých částí proudové dráhy, vždy zároveň se záznamem termogramu termokamerou. V programu SATIR Report bylo poté změnou nastavení hodnoty emisivity snahou dostat se na stejnou teplotu jako referenčním teploměrem. Za správnou hodnotu emisivity určitého materiálu lze stanovit takovou emisivitu, kdy se teploty přesně rovnají. Takto provedené určení emisivity je znázorněno na Obr. 7-4, kde byla emisivita v měřeném bodě č. 13 – část transformátoru určena 0,66, což odpovídá rozsahu emisivity, 0,4-0,8, pro zoxidovanou měď z Tab. 6-3.



**Obrázek 7-4 a) Měření referenčním teploměrem; b) úprava termosnímku**

V následující Tabulce 7-3 jsou uvedeny emisivity jednotlivých částí z různých materiálů, zastoupené body, kde byla měřena teplota, zjištěné touto experimentální metodou. Body, ve kterých bylo provedeno měření dotykovým teploměrem a následně k nim vztahovány hodnoty emisivity, jsou vyznačeny na Obr. 7-5.



**Obrázek 7-5 Měřené body - určování emisivity částí odpínače**

**Tabulka 7-3 Určení emisivity materiálů odpínače**

Číslo	Měřený bod	θ <sub>1</sub> [°C]	Emisivita [-]	θ <sub>2</sub> [°C]
1	přívodní kabel - povrch izolace	35,4	1	37,0
2	přívodní kabel - přechod na oko	35,4	1	38,5
3	oko přívodního kabelu	40,9	0,21	41,2
4	část odpínače spojená s přívodním kabelem	41,5	0,52	41,4
5	patice izolátoru	38,0	1	39,8
6	připojovací pás odpínače	56,1	0,21	56,4
7	pevný kontakt odpínače	38,2	0,23	38,0
8	pohyblivý kontakt odpínače	40,5	0,15	40,8
9	roh kovového držáku zhášecí komory	36,3	0,69	36,2
10	část odpínače spojená s výstupním kabelem	39,2	0,16	39,0
11	oko výstupního kabelu – s nánosem cizí vrstvy	40,2	0,96	40,2
12	oko výstupního kabelu - hladce obroušená část	40,5	0,20	40,5
13	část transformátoru	29,5	0,66	29,5
Pozn. θ <sub>1</sub> - teplota změřená referenčním dotykovým teploměrem				
θ <sub>2</sub> - teplota odpovídající emisivitě v programu SATIR Report				

Není-li znám materiál jednotlivých částí a dojde k takovému experimentálnímu určení emisivity, je možné určit, o které materiály, popř. s jakou povrchovou úpravou, se jedná. Obecně lze říci, že lesklé kovy mají emisivitu nízkou, často 0,1 a méně. Hodnoty určené v Tab. 7-3 se pohybují kolem 0,2, což lze přičítat stáří materiálu a mírou oxidace. Z měření je však patrné, že izolace na přívodním kabelu, která je černé barvy, a patice izolátoru se svými vyzařovacími vlastnostmi blíží vlastnostem černého tělesa. Velmi blízko emisivitě černého tělesa je i měření na oku výstupního kabelu v místě s nánosem cizí vrstvy, rovněž černé barvy. Ve srovnání s místem té samé součásti, které je však obroušeno, je patrná výrazná změna emisivity.

### 7.2.3 Měření oteplení částí proudové dráhy

Je-li známa emisivita materiálů konstrukčních částí odpínače, lze postupně s časem sledovat jejich oteplení při průchodu jmenovitého proudu a zjišťovat hot spoty, které podléhají největšímu oteplení.

Oteplením vysokonapěťových a řídicích zařízení se zabývá zkouška trvalým proudem, jedna ze základních typových zkoušek. Podmínkami této zkoušky se zabývá norma ČSN EN 62271-1 ed.2, z které nepřímě vychází diagnostické měření prováděné v této bakalářské práci. V Tab. 7-4 jsou uvedeny maximální dovolené hodnoty teplot a oteplení dle [20]:

**Tabulka 7-4 Maximální dovolené hodnoty teplot a oteplení částí elektrických přístrojů [20]**

Část	Materiál	Izolace	Nejvyšší hodnota (při okolí 10-40 °C)	
			Teplota [°C]	Oteplení [K]
kontakty	měď a slitiny mědi bez pokovení	OG	75	35
		NOG	115	75
		olej	80	40
	měď a slitiny mědi pokovené (stříbrem, niklem)	OG	115	75
		NOG	115	75
		olej	90	50
šroubová nebo ekvivalentní spojení	měď a slitiny mědi nebo hliníku bez pokovení	OG	100	60
		NOG	115	75
		olej	100	60
	měď a slitiny Cu nebo Al pokovené (stříbrem, niklem)	OG	115	75
		NOG	115	75
		olej	100	60
šroubové přívodní svorky	pokovené (stříbrem, niklem)		115	75

Vysvětlivky k Tab. 7-4: označení OG nesou oxidační (popř. reaktivní) plyny, které jsou příčinou urychleného stárnutí materiálů oxidací či korozí. Do této skupiny plynů patří především vzduch. Skupina plynů označena NOG naopak nezpůsobuje urychlené stárnutí kontaktů. Neoxidačními plyny jsou např. SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub>.

Oteplení odpínače bylo sledováno po dobu 1 hodiny s pořizováním termogramů všech proudovodných částí odpínače každých 5 minut.

Pořízené termovizní snímky mohly být následně vyhodnoceny v programu SATIR Report. Hodnoty odečtených teplot a vypočteného oteplení jsou zaznamenány v Tab. 7-5 a Tab. 7-6. Čísla 4-12 odpovídají bodům z Obr. 7-5, které reprezentují části proudové dráhy. Grafické vyhodnocení měření je na Obr. 7-6. V úvahu je brán zjednodušující předpoklad, že celý odpínač je v teplotní rovnováze a všechny jeho části mají na začátku měření stejnou teplotu s okolím.

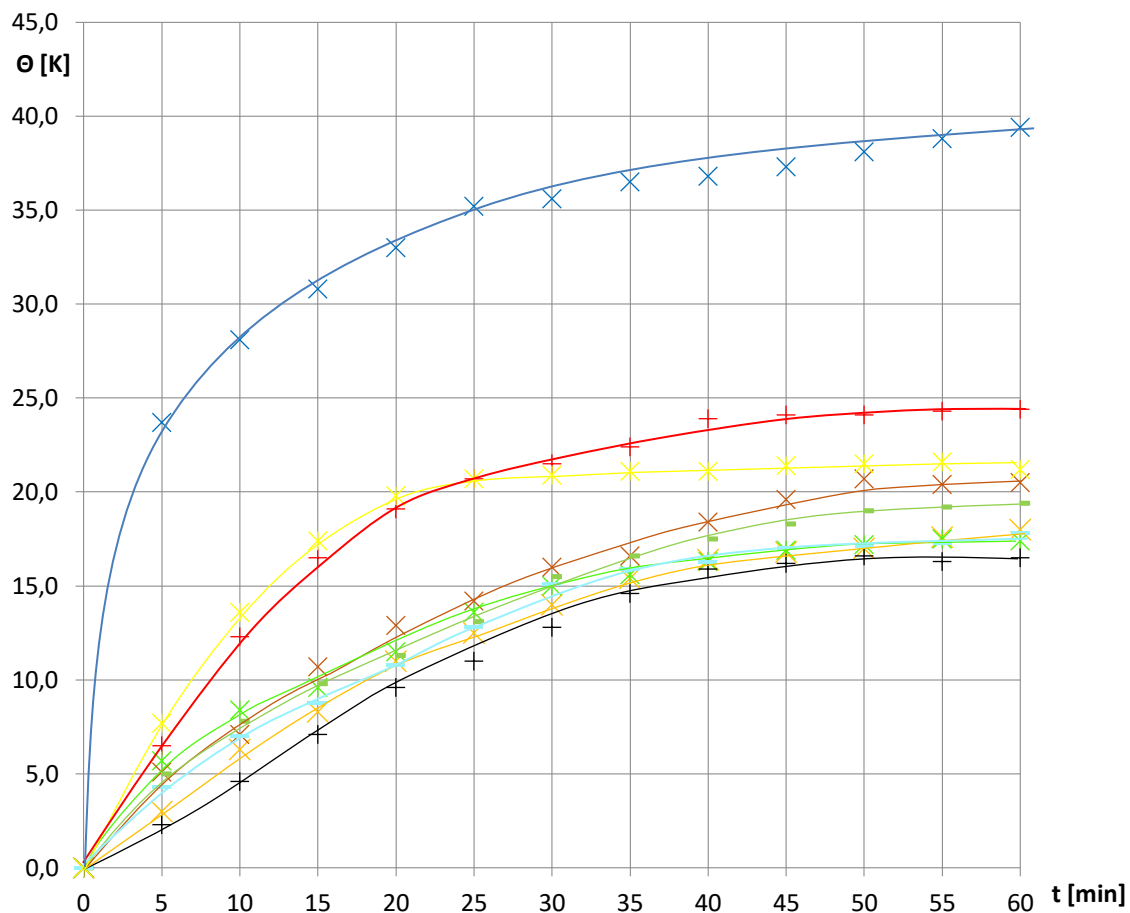
**Tabulka 7-5 Hodnoty teplot měřených částí odpínače**

I [A]	t [min]	$\vartheta_4$ [°C]	$\vartheta_5$ [°C]	$\vartheta_6$ [°C]	$\vartheta_7$ [°C]	$\vartheta_8$ [°C]	$\vartheta_9$ [°C]	$\vartheta_{10}$ [°C]	$\vartheta_{11}$ [°C]	$\vartheta_{12}$ [°C]
400	0	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4
400	5	27,9	24,4	45,1	27,1	26,5	23,7	26,4	25,7	29,1
400	10	33,7	27,7	49,5	29,8	28,5	26,0	29,2	28,4	35,0
400	15	37,9	29,7	52,2	31,0	32,1	28,5	31,2	30,2	38,8
400	20	40,5	32,4	54,4	32,9	34,3	31,0	32,7	32,2	41,2
400	25	42,1	33,9	56,6	35,0	35,6	32,4	34,5	34,2	42,1
400	30	42,9	35,4	57,0	36,4	37,4	34,2	36,9	36,5	42,3
400	35	43,8	36,8	57,9	37,0	38,0	36,0	38,0	37,3	42,5
400	40	45,3	37,8	58,2	37,7	39,8	37,3	38,9	37,7	42,5
400	45	45,5	38,2	58,7	38,3	41,0	37,6	39,7	38,4	42,8
400	50	45,5	38,4	59,5	38,6	42,1	38,0	40,4	38,5	42,9
400	55	45,7	39,0	60,2	38,9	41,8	37,7	40,6	38,7	43,0
400	60	45,8	39,4	60,8	38,8	41,9	37,9	40,8	39,2	42,6

**Tabulka 7-6 Hodnoty vypočítaného oteplení částí odpínače**

I [A]	t [min]	$\theta_4$ [K]	$\theta_5$ [K]	$\theta_6$ [K]	$\theta_7$ [K]	$\theta_8$ [K]	$\theta_9$ [K]	$\theta_{10}$ [K]	$\theta_{11}$ [K]	$\theta_{12}$ [K]
400	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
400	5	6,5	3,0	23,7	5,7	5,1	2,3	5,0	4,3	7,7
400	10	12,3	6,3	28,1	8,4	7,1	4,6	7,8	7,0	13,6
400	15	16,5	8,3	30,8	9,6	10,7	7,1	9,8	8,8	17,4
400	20	19,1	11,0	33,0	11,5	12,9	9,6	11,3	10,8	19,8
400	25	20,7	12,5	35,2	13,6	14,2	11,0	13,1	12,8	20,7
400	30	21,5	14,0	35,6	15,0	16,0	12,8	15,5	15,1	20,9
400	35	22,4	15,4	36,5	15,6	16,6	14,6	16,6	15,9	21,1
400	40	23,9	16,4	36,8	16,3	18,4	15,9	17,5	16,3	21,1
400	45	24,1	16,8	37,3	16,9	19,6	16,2	18,3	17,0	21,4
400	50	24,1	17,0	38,1	17,2	20,7	16,6	19,0	17,1	21,5
400	55	24,3	17,6	38,8	17,5	20,4	16,3	19,2	17,3	21,6
400	60	24,4	18,0	39,4	17,4	20,5	16,5	19,4	17,8	21,2

## Průběhy oteplení částí odpínače



Obrázek 7-6 Průběhy oteplení částí odpínače CUB S2.25.400.S...V1a

- θ4 Oteplení vstupního praporce
- × θ5 Oteplení patice izolátoru
- × θ6 Oteplení připojovacího pásu odpínače
- \* θ7 Oteplení pevného kontaktu
- × θ8 Oteplení pohybového kontaktu
- + θ9 Oteplení kovového držáku zhášecí komory
- θ10 Oteplení výstupního praporce
- θ11 Oteplení oka výstupního kabelu v části s nánosem cizí vrstvy
- \* θ12 Oteplení výstupního oka v obroušené části

Obrázek 7-7 Legenda k průběhům oteplení

## 7.2.4 Vyhodnocení měření

Z měření přechodového odporu byly zjištěny přechodové odpory veškerých spojů proudovodné dráhy odpínače, které lze označit za dostatečně malé, aby nepůsobily neúnosné ztráty. Vyšší přechodový odpor byl změřený na spoji vstupního praporce a připojovacího pásu,  $38,3 \mu\Omega$ , což lze vysvětlit konstrukcí přívodního pásu tvořeného několika plíškami, mezi kterými jsou přechodové odpory, jež se sčítají do celkového odporu. Dalším vysvětlením by mohla být nedostatečná přitlačná síla. Při působení nežádoucích vlivů by mohl být případně problémový. Pro zmenšení tohoto přechodového odporu by bylo možné zvýšit plochu spoje, použít ve spoji materiál s menší rezistivitou či zvýšit přitlačnou sílu. Zdrojem možných chyb mohla být nepřesnost měřicího přístroje, ale spíše umístění proudových a napěťových svorek ve špatně přístupných místech odpínače tak, že mikroohmmetr změřil vyšší hodnotu, než byl samotný přechodový odpor spoje.

Zdroje chyb při měření pro určení emisivity mohly spočívat v nepřesném měření teploty dotykovým teploměrem, který sám ovlivňuje měření vstupem do teplotního pole měřeného objektu, a dále nepřesným určením měřeného bodu v programu SATIR Report, což mohlo zanechat nepřesnosti měření i pro určování oteplení.

Grafické vyhodnocení měření na Obr. 7-6 ukazuje, že největšího oteplení dosahuje připojovací pás odpínače. Hodnota tohoto oteplení je 39,4 K. Norma udává maximální oteplení 75 K. Dalo by se předpokládat, že teplota by nadále nevzrůstala nijak razantně a odpínač CUB S2.25.400.S...V1a by vyhověl oteplovací zkoušce dle ČSN EN 62271-1 ed. 2. Dosažení menšího oteplení by bylo možné použitím jiného materiálu, snížením přechodového odporu na kontaktu připojovacího pásu a praporce, popř. přidáním pásků, ze kterých je připojovací pás složen, což by vedlo ke zvětšení průřezu vodiče. Ostatní části by pravděpodobně nepřekročili normou danou hodnotu maximálního oteplení.

Znamená to, že přístroj je navržen správně, není nikterak poškozen a může být zařazen do provozu. Výše uvedené zdroje chyb nemají vliv na vyhodnocení správnosti návržení, protože jak v případě měření přechodových odporů, tak v případě oteplovací zkoušky je přístroj dimenzován s určitou rezervou.

Podmínky okolního prostředí: tlak – 977,1 hPa  
vlhkost – 31,9 %  
teplota – 21,4 °C



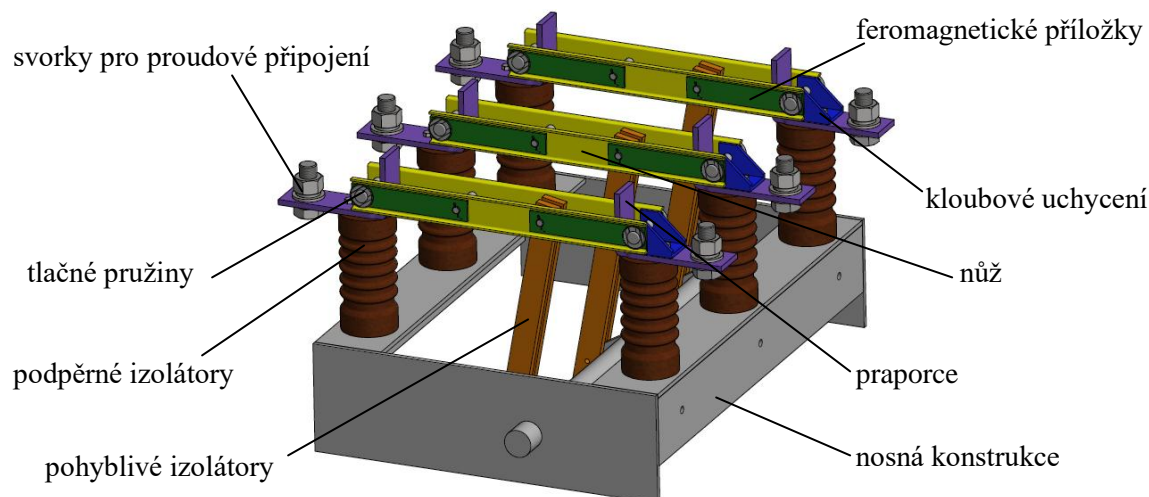
### 7.3. Měření na odpojovači QAK 12.400.25/1.P.R.-.-.200/3

Měření na vnitřním nožovém odpojovači vn probíhalo shodně jako na odpínači. V tomto případě se však jednalo o třípólový přístroj, jehož póly byly do obvodu zapojeny do série – Obr. 7-8, což umožňuje i ČSN EN 62271-1 ed. 2 při zkouškách trvalým proudem do hodnoty jmenovitého proudu 1250 A. Pro větší přesnost konečného oteplení byla doba měření zvýšena na 2 h a pro přesnější určení prvotního nárůstu teploty také navýšena frekvence pořizování termogramů po dobu 10 minut.



Obrázek 7-8 Zapojení pólů odpojovače do série

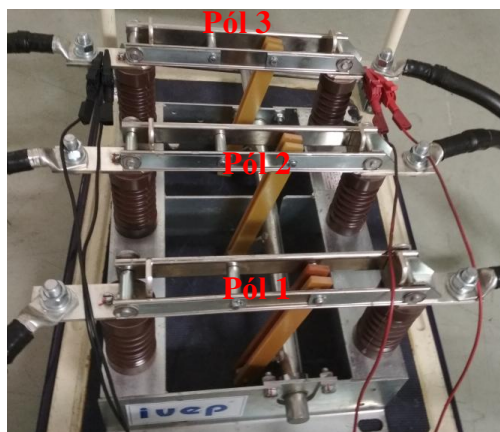
Obr. 7-9 ukazuje 3D model vytvořený v programu Autodesk Inventor podle skutečných rozměrů. Proudovodná dráha je provedena elektrovednou mědí (99,9 %), jejíž povrch je pokoven niklem, spojovací materiál proveden galvanicky zinkovanou ocelí, stejně jako nosná konstrukce. Kontaktní sílu, která zajišťuje dostatečný kontakt s optimálním přechodovým odporem mezi praporce a noži, obstarávají tlačné pružiny. Proudovodná dráha leží na podpěrných izolátorech z epoxidové pryskyřice, které slouží k elektrickému oddělení částí proudové dráhy od nosné konstrukce. Krom podpěrných izolátorů se uprostřed pólu nachází izolátor napojený na pohony odpojovače.



Obrázek 7-9 3D model odpojovače QAK

### 7.3.1 Měření přechodového odporu

V tomto případě byly přechodové odpory změřeny pouze na spojích proudových kabelů s praporcí, protože přesné změření přechodových odporů na hlavních kontaktech odpojovače znemožňuje paralelní řazení více kontaktních míst mezi nožem a praporcem. Proto byl změřen odpor každého pólu zvlášť jako určitý součet všech přechodových odporů a odporu celého nože odpojovače. Svorky měřicího přístroje byly umístěny na vstupní a výstupní praporce, viz Obr. 7-10.



Obrázek 7-10 Měření odporu pole odpojovače

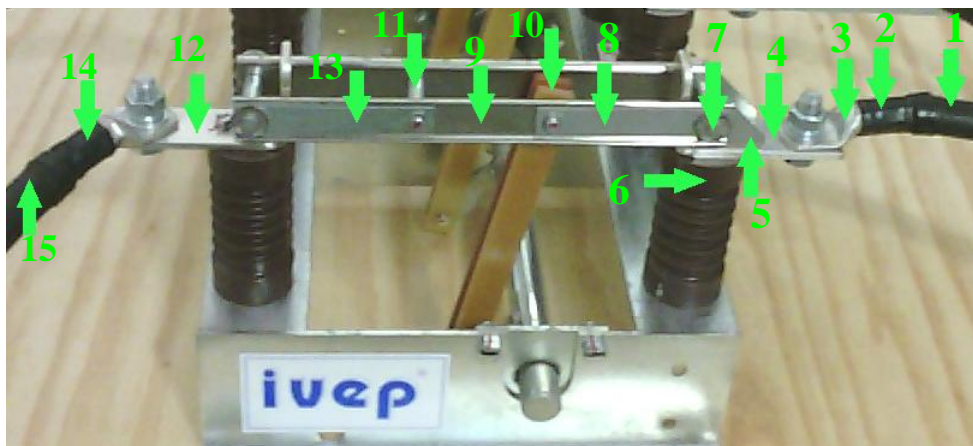
Změřené odpory jsou zaznamenány v Tab. 7-7. Přechodové odpory na kontaktech kabel – praporec byly měřeny při definovaném momentu dotažení šroubů  $M = 30 \text{ Nm}$ . Hodnoty přechodových odporů nejsou větší než  $0,15 \text{ m}\Omega$ , dokonce ani součet odporů v jednotlivých polích nepřesáhl tuto hodnotu. Z měření lze však predikovat, že části proudovodné dráhy na Pólu 1 by měly podléhat nejmenšímu tepelnému namáhání, naopak největší oteplení by mělo nastat na částech Pólu 3.

Tabulka 7-7 Odpory proudovodné dráhy odpojovače

Označení	Kontakt	$R_s [\mu\Omega]$	$I [A]$	$U_s [mV]$
1	Pól 1	70	10,0	0,70
2	přívodní kabel - praporec	62	10,0	0,62
3	praporec - odvodní kabel	48	10,0	0,48
4	Pól 2	85	10,0	0,85
5	přívodní kabel - praporec	34	10,0	0,34
6	praporec - odvodní kabel	49	10,0	0,49
7	Pól 3	96	10,0	0,96
8	přívodní kabel - praporec	50	10,0	0,50
9	praporec - odvodní kabel	45	10,0	0,45

### 7.3.2 Určení emisivity materiálu

I pro určení emisivity materiálů částí odpojovače byla použita metoda referenčního teploměru, kterým byl kalibrovaný dotykový teploměr AHLBORN THERM 2420. Termosnímkou byly pořizovány modernější termokamerou FLIR E95 a následně vyhodnocovány v programu FLIR Tools. Zjištěné hodnoty emisivity jsou zaznamenány v Tab. 7-8. Na Obr. 7-11 jsou vyznačeny místa měření teplot uvedená v tabulce.



Obrázek 7-11 Měření body - určování emisivity částí odpojovače

Tabulka 7-8 Hodnoty emisivit - odpojovač QAK

Číslo	Měřený bod	$\vartheta_1$ [°C]	Emisivita [-]	$\vartheta_2$ [°C]
1	přívodní kabel - povrch izolace	38,3	1	39,6
2	přívodní kabel - přechod na oko	38,6	1	39,7
3	oko kabelu	43,4	0,38	43,4
4	vstupní praporec	43,8	0,19	43,6
5	pevný kontakt - uchycení	43,1	0,25	43,1
6	patice izolátoru	36,7	1	37,5
7	čep u tlačné pružiny	42,4	0,29	42,4
8	feromagnetická příložka	41,8	0,21	41,8
9	nůž odpojovače	41,9	0,18	41,9
10	pohyblivý izolátor	36,1	1	36,9
11	distanční váleček	41,0	0,38	41,0
12	výstupní praporec	42,1	0,22	42,1
13	feromagnetická příložka 2	41,5	0,21	41,5
14	výstupní kabel - přechod na oko	39,2	1	41,0
15	výstupní kabel - povrch izolace	38,4	1	39,5

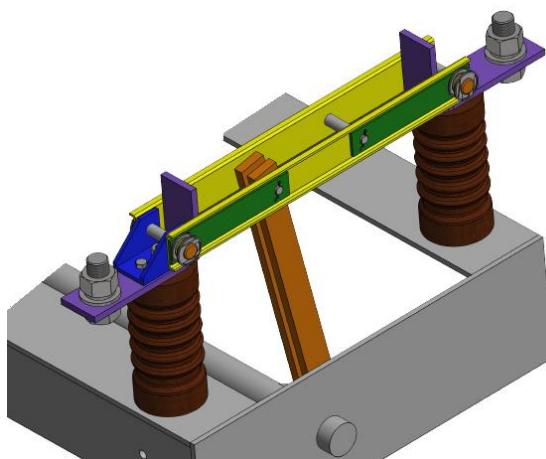
### 7.3.3 Měření oteplení částí proudové dráhy

Vyhodnocení měření provedeného na odpojovači QAK je zaměřeno na Pól 1, na kterém bylo v průběhu měření provedeno několik kontrolních zaznamenání teplot pomocí dotykového teploměru. Tabulky změřených teplot jednotlivých částí proudovodné dráhy obsahuje Příloha 1, Příloha 2 pak vypočtené hodnoty oteplení opět za předpokladu tepelné rovnováhy s okolním prostředím před zapojením přístroje do elektrického obvodu. V Tab. 7-9 jsou uvedeny hodnoty oteplení pro určité časy.

**Tabulka 7-9 Oteplení proudovodných částí odpojovače**

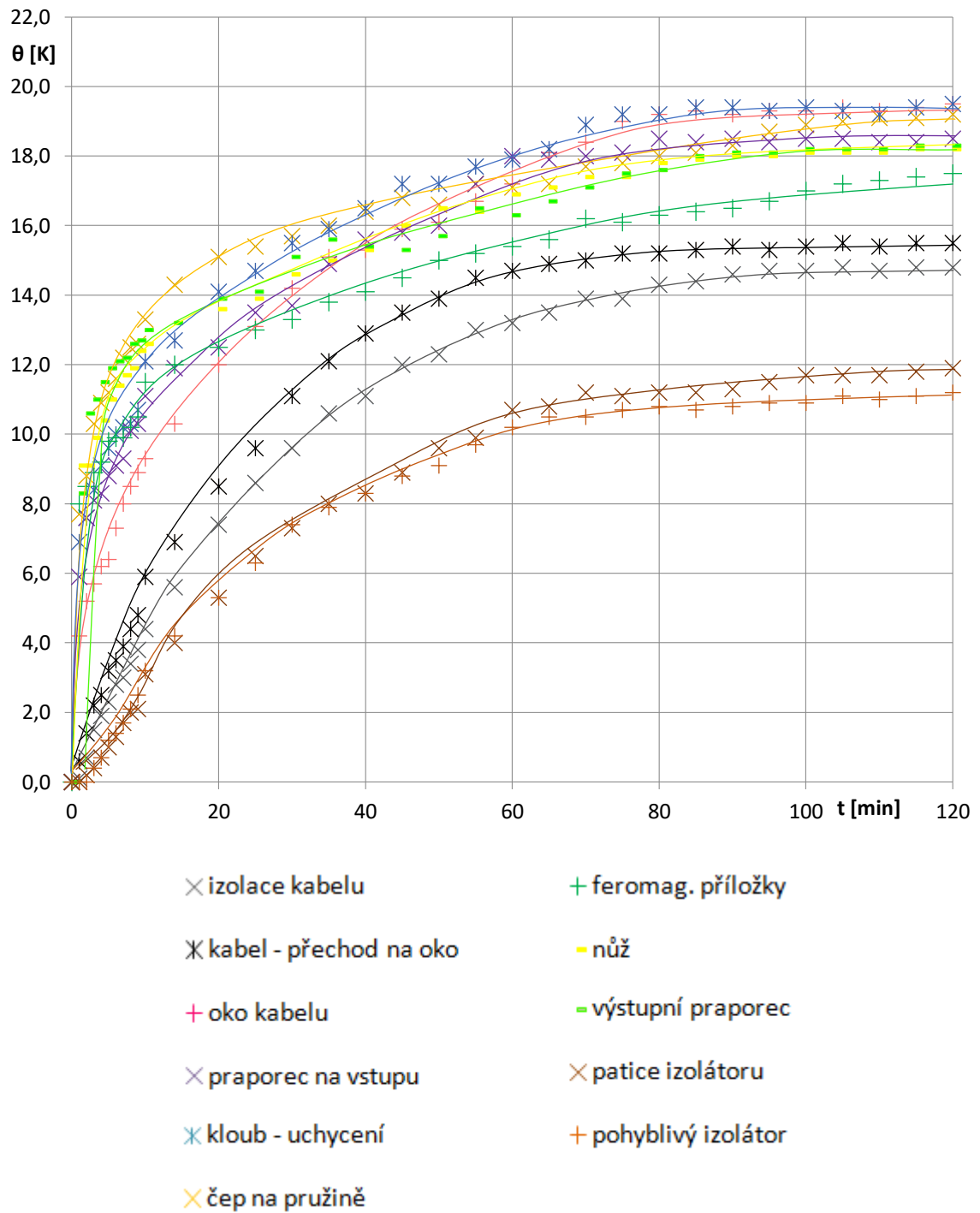
Pól 1		kabely										
		izolace	přechod na oko	oko kabelu	praporec na vstupu	kloub - uchycení	čep na pružině	feromag. příložky	nůž	výstupní praporec	izolátor patice	pohyblivý izolátor
I [A]	t [min]	$\theta_1$ [K]	$\theta_2$ [K]	$\theta_3$ [K]	$\theta_4$ [K]	$\theta_5$ [K]	$\theta_6$ [K]	$\theta_7$ [K]	$\theta_8$ [K]	$\theta_9$ [K]	$\theta_{10}$ [K]	$\theta_{11}$ [K]
400	5	2,3	3,2	6,4	11,2	9,6	8,8	9,8	11,0	11,9	1,0	1,2
400	20	7,4	8,5	12,0	15,1	14,1	12,5	12,5	13,6	13,9	5,3	5,3
400	45	12,0	13,5	15,9	16,8	17,2	15,8	14,5	16,0	15,3	8,9	8,8
400	70	13,9	15,0	18,4	17,7	18,9	18,0	16,2	17,4	17,1	11,2	10,5
400	105	14,8	15,5	19,4	19,0	19,3	18,5	17,2	18,1	18,2	11,7	11,1
400	120	14,8	15,5	19,5	19,2	19,5	18,5	17,5	18,2	18,3	11,9	11,2

Grafické zpracování sledovaného oteplení nabízí Obr. 7-13. Barvy jednotlivých oteplovacích křivek se shodují s barvami částí odpojovače (Pólu 1 – Obr. 7-12) zpracovaného v programu Inventor, lze tedy sledovat, které části dosáhly jakého oteplení.



**Obrázek 7-12 3D model pólu 1 - oteplení částí**

## Průběhy oteplení částí odpojovače



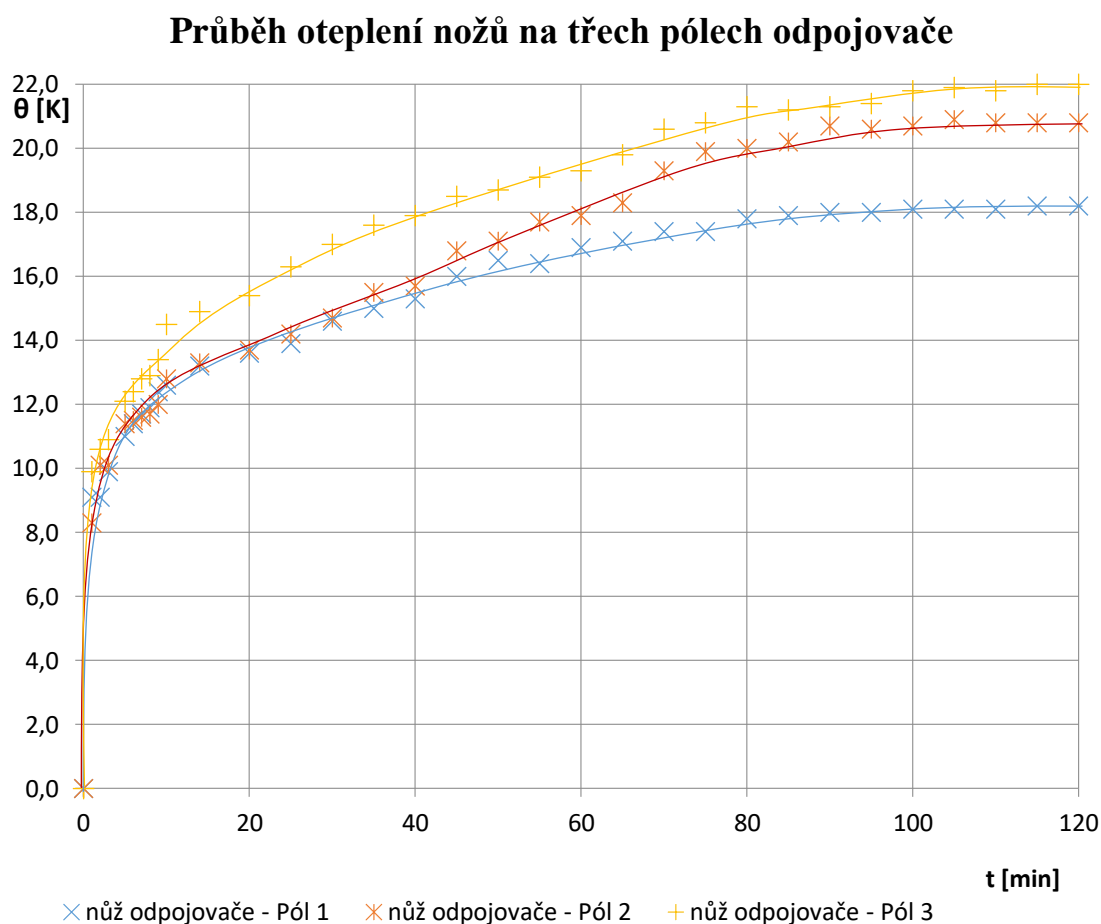
Obrázek 7-13 Průběhy oteplení částí odpojovače – Pól 1

Doposavad se zpracování naměřených hodnot zabývalo pouze jedním ze tří pólů odpojovače. Oteplení částí dalších dvou pólů se však liší, nejpatrnější rozdíly byly zjištěny na kontaktním noži. Pro porovnání naměřených hodnot teplot a z nich vypočteného oteplení na všech třech nožích slouží Tab. 7-10, grafické rozdíly jsou ukázány na Obr. 7-14.

**Tabulka 7-10 Hodnoty teplot a oteplení na kontaktních nožích**

	Pól 1	Pól 2	Pól 3
t [min]	$\vartheta_1$ [°C]	$\vartheta_2$ [°C]	$\vartheta_3$ [°C]
0	23,7	23,7	23,7
1	32,8	32,0	33,6
2	32,8	33,8	34,3
3	33,6	33,8	34,6
4	34,1	34,3	35,1
5	34,7	35,1	35,8
6	35,1	35,2	36,1
7	35,4	35,3	36,5
8	35,6	35,4	36,6
9	36,1	35,7	37,1
10	36,3	36,5	38,2
14	36,9	37,0	38,6
20	37,3	37,4	39,1
25	37,6	37,9	40,0
30	38,3	38,4	40,7
35	38,7	39,2	41,3
40	39,0	39,4	41,6
45	39,7	40,5	42,2
50	40,2	40,8	42,4
55	40,1	41,4	42,8
60	40,6	41,6	43,0
65	40,8	42	43,5
70	41,1	43	44,3
75	41,1	43,6	44,5
80	41,5	43,7	45,0
85	41,6	43,9	44,9
90	41,7	44,4	45,0
95	41,7	44,3	45,1
100	41,8	44,4	45,5
105	41,8	44,6	45,6
110	41,8	44,5	45,5
115	41,9	44,5	45,7
120	41,9	44,5	45,7

Pól 1	Pól 2	Pól 3
$\theta_1$ [K]	$\theta_2$ [K]	$\theta_3$ [K]
0,0	0,0	0,0
9,1	8,3	9,9
9,1	10,1	10,6
9,9	10,1	10,9
10,4	10,6	11,4
11,0	11,4	12,1
11,4	11,5	12,4
11,7	11,6	12,8
11,9	11,7	12,9
12,4	12,0	13,4
12,6	12,8	14,5
13,2	13,3	14,9
13,6	13,7	15,4
13,9	14,2	16,3
14,6	14,7	17,0
15,0	15,5	17,6
15,3	15,7	17,9
16,0	16,8	18,5
16,5	17,1	18,7
16,4	17,7	19,1
16,9	17,9	19,3
17,1	18,3	19,8
17,4	19,3	20,6
17,4	19,9	20,8
17,8	20,0	21,3
17,9	20,2	21,2
18,0	20,7	21,3
18,0	20,6	21,4
18,1	20,7	21,8
18,1	20,9	21,9
18,1	20,8	21,8
18,2	20,8	22,0
18,2	20,8	22,0



**Obrázek 7-14 Průběh oteplení nožů**

### 7.3.4 Vyhodnocení měření

Diagnostikovaná zařízení, odpínač a odpojovač, slouží v praxi v odlišných funkcích, avšak provedená měření měla mnoho znaků společných. Proto chyby měření při určování přechodového odporu a emisivity popsané v podkapitole 7.2.4 se mohly vyskytnout i v tomto případě. Chyba měření teploty dotykovým teploměrem by však neměla být velká z důvodu použití kalibrovaného měřidla. Určení emisivity tak bylo správné, což dokazují hodnoty získané měřením (Tab. 7-3), které se v případě částí proudovodné dráhy pokovené niklem pohybují v rozsahu 0,18-0,25, což by odpovídalo dle Tab. 6-3 hodnotám mírně zoxidovaného niklu.

Dále se práce zaměřovala na diagnostiku částí odpojovače. Dle [21] nejsou spínací přístroje QAK náročné na údržbu a revizi, pro zajištění spolehlivosti je doporučeno provádět vizuální kontroly min. 1x ročně a kontroly teploty (oteplení) hlavních

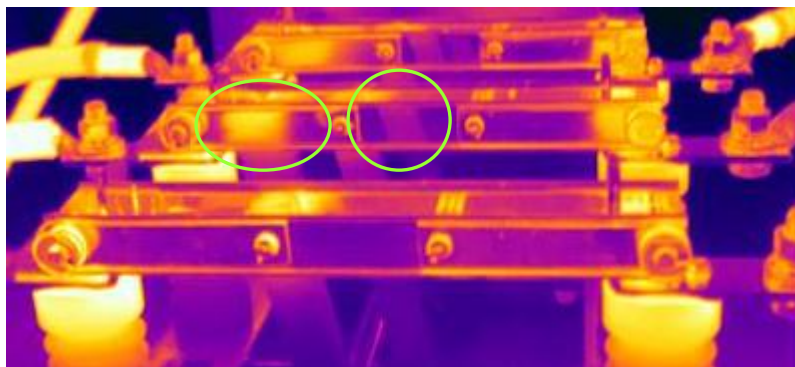


el. obvodů přístroje pomocí termovize. Výrobce doporučena diagnostika termovizí by měla proběhnout po průchodu zkratového proudu, ale také za běžného provozu, a to opět minimálně jednou za rok.

Oteplení se sleduje z důvodu zaručení neovlivnění mechanické pevnosti a schopností izolačních a vodivých těchto částí, tedy zaručení bezpečného provozu přístroje. Již z měření přechodového odporu bylo patrné, že části různých pólů se budou zahřívat mírně odlišně. Předpoklad stanovený právě z měření odporu se potvrdil, viz Obr. 7-14, kde oteplení nožů kopíruje hodnoty naměřených odporů, sestupně od Pólu 3. Rozdíl oteplení jednotlivých nožů není zpočátku příliš patrný, ale zvětšuje se s postupem času, což ukazuje právě na vliv přechodového odporu, který s rostoucí teplotou roste a způsobuje vyšší tepelné ztráty. Vliv odporu však nebyl jediný, který způsobil zjištěné odlišnosti v teplotách na různých pólech. Zvláště při vyšších teplotách se začaly výrazněji projevovat také tepelné odrazy na lesklých površích s nízkou emisivitou. Nejpozorovatelnější byly právě na kontaktních nožích a příložkách, což ukazuje Obr. 7-15, kde jsou patrné odrazy izolátorů. Za nezkreslené lze považovat hodnoty Pólu 1, zpracovávané v podkapitole 7.3.3, které byly monitorovány občasnou kontrolou dotykovým teploměrem.

Při pohledu na graf průběhů oteplení částí odpojovače – Obr. 7-13 je patrné, že ať prvotní nárůst teplot jednotlivých částí byl rozdílný, všechny proudovodné části se postupně ustálily ještě pod hodnotou 20 K. S ohledem na maximální dovolené oteplení 75 K lze přístroj jednoznačně označit za splňující normu ČSN EN 62271-1 ed. 2.

Konstrukce odpojovače je správně navržena, aby byla schopna dle normy odolat tepelnému namáhání trvalým jmenovitým proudem, s ohledem na jisté předdimenzování by se dalo předpokládat i při krátkodobém přetížení, popř. poruše do vypnutí obvodu.

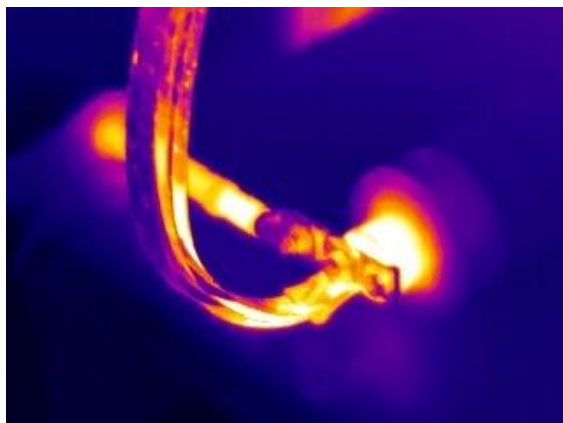


Podmínky okolí:  
tlak – 978,1 hPa  
vlhkost – 30,8 %  
teplota – 23,7 °C

**Obrázek 7-15 Odrazy na pólech odpojovače**



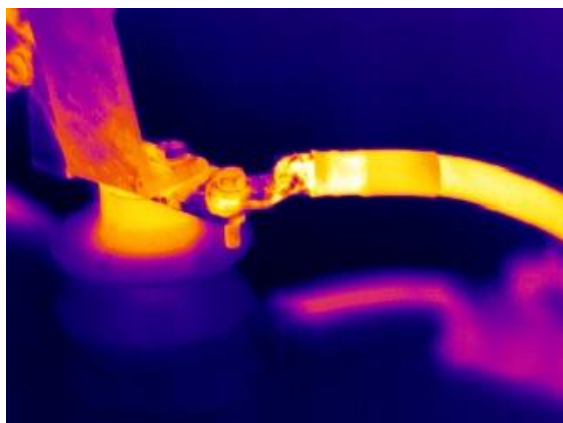
#### 7.4. Snímky z termokamery SAT-HY 6800 – z části 7.2



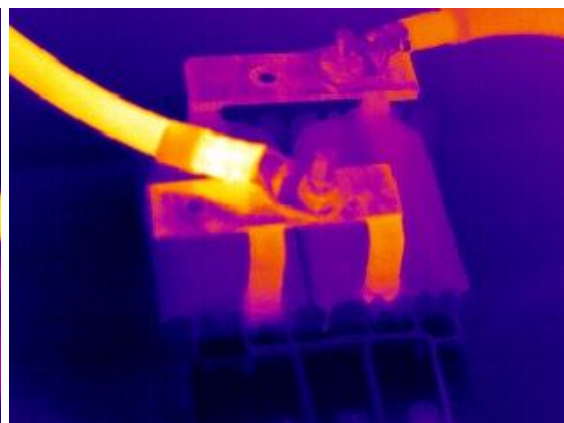
Obrázek 7-16 Termosnímek přechodu  
přívodní kabel - vstupní praporec



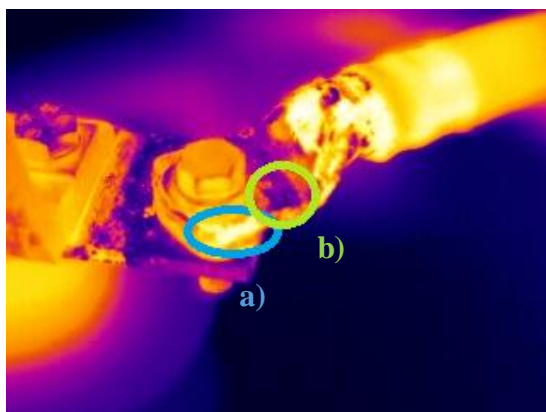
Obrázek 7-17 Termosnímek pevného  
a pohyblivého kontaktu



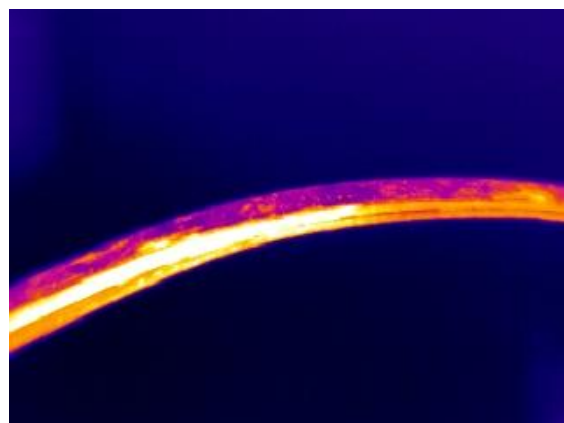
Obrázek 7-18 Termosnímek přechodu  
výstupní praporec - výstupní kabel



Obrázek 7-19 Termosnímek  
transformátoru TVB U 168.75/107

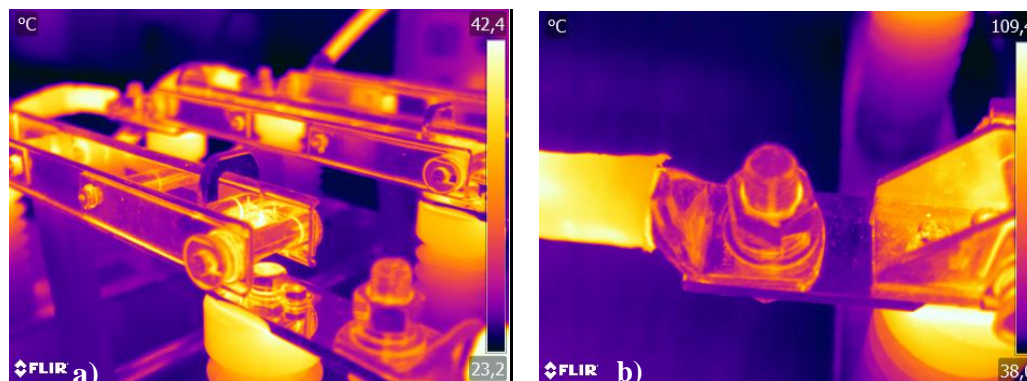


Obrázek 7-20 Termosnímek detailu  
a) místa s cizí vrstvou;  
b) obroušené místo



Obrázek 7-21 Termosnímek  
připojovacího pásu odpínače

## 7.5. Snímky pořízené termokamerou FLIR E95 – z části 7.3



Obrázek 7-22 Detail a) hlavního kontaktu, b) šroubového spoje

## 7.6. Poznatky z měření termovizní kamerou

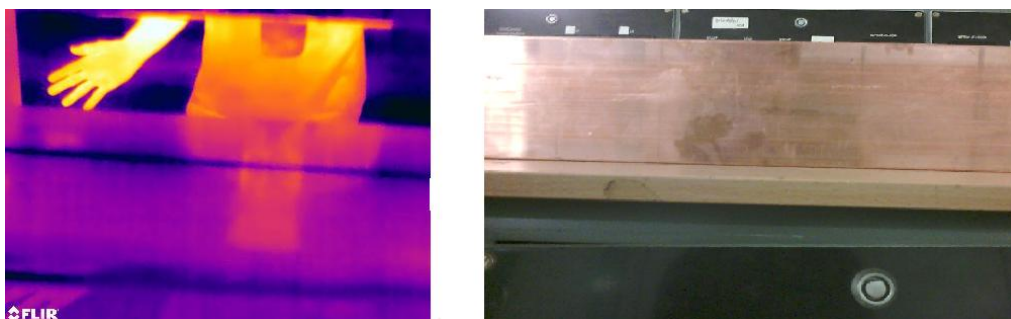
Čím dál běžnějším prvkem diagnostiky začíná být termovize, která však nepatří k nejjednodušším metodám a vyžaduje určitou zkušenost a znalost práce s termokamerou. Několik základních pravidel je shrnuto v této části.

Využití termovize daleko přesahuje silnoproudá zařízení. Další uplatnění nachází ve spoustě jiných odvětví - stavebnictví, medicína, ale také v prostorech se sníženou viditelností. Jak bylo řečeno již v úvodu kapitoly o bezdotykovém měření teploty, hlavním principem metody je snímání elektromagnetického záření objektů, to zahrnuje především neviditelné infračervené záření a pouze v případě velmi vysokých teplot část viditelného spektra. Proto termovize umožňuje noční vidění a pomáhá např. i při hledání ztracených lidí díky tepelným stopám, které zůstávají patrné po určitou dobu. Příklad tepelné stopy je na Obr. 7-23 a), kdy byla ruka přitlačena na zeď po dobu 1 minuty. Pro oko neviditelný obtisk dlaně (b)) je jasně patrný při použití termokamery, ještě po 3,5 minutách bylo rozpoznat ruku a ještě po 5,5 minutách tepelnou stopu (c)). Takové stopy však mohou při nesprávné manipulaci s měřeným přístrojem způsobovat určité nepřesnosti měření.



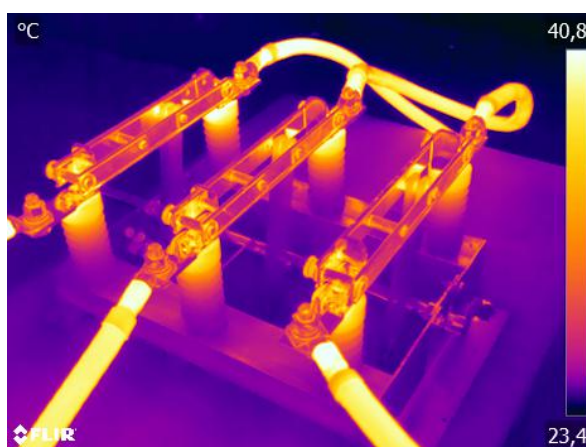
Obrázek 7-23 Příklad tepelné stopy

Problematické může být také diagnostikování lesklých povrchů, často kovů leštěných či pokovených např. stříbrem nebo niklem, tak jako tomu bylo také v této bakalářské práci. Ty často odrážejí velkou část dopadajícího záření a mají nízkou emisivitu, viz Tab. 7-8. Zkreslené výsledky mohou způsobit právě tepelné odrazy - odrazy okolního záření, záření jiných částí přístroje, ale i odrazy samotného měřitele, tak jak je demonstrativně ukázáno na Obr. 7-24 na měděné přípojnici.



**Obrázek 7-24 Příklad tepelného odrazu**

Dalším aspektem, na který je třeba dbát při měření termokamerou, je popsán v části 6.2.2. Emisivita a její určení. Potvrzení lze nalézt na Obr. 7-25, kde se jeví jako nejteplejší vodiče potažené černou izolací a patice izolátorů. Po stanovení emisivity všech částí přístroje a zpracování v programu se však ukazuje, že nejvyšší teploty a hodnoty oteplení jsou u částí, kterými přímo prochází elektrický proud, viz grafy oteplení.



**Obrázek 7-25 Demonstrace zkreslení výsledku při neznalosti emisivity**

## 8. MODIFIKACE PŘÍSTROJE

Z diagnostických měření provedených v této bakalářské práci vyplynulo, že přístroje jsou navrženy správně, tedy tak, že vyhovují normám, nejsou nikterak poškozeny a jejich použití v praxi je bezpečné. Mírné úpravy na odpínači byly krátce popsány v odstavci 7.2.4, tato část se zaměřuje na možné úpravy nožového odpojovače QAK.

Dle vyhodnocení měření provedeného na tomto zařízení lze konstatovat, že přístroj je dimenzován s poměrně velkou rezervou, což byl očekávaný výsledek s ohledem na fakt, že odpojovač typu QAK je moderní přístroj, splňující aktuální technické normy týkající se spínacích zařízení, kde je kladen velký důraz na provozní spolehlivost.

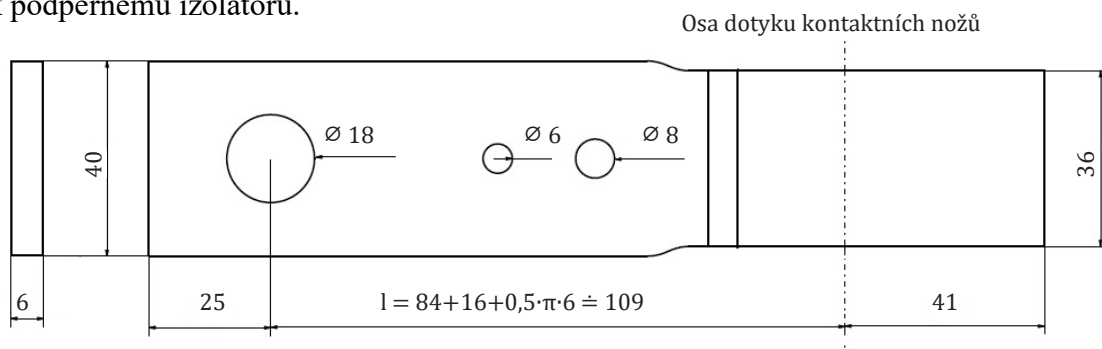
V nynější době je však důležitým faktorem také cena přístroje. Aby byl finální produkt konkurenceschopný, musí se najít ideální kompromis mezi spolehlivostí a cenou, to vždy záleží na požadavcích investorů.

Obecné požadavky na odpojovače vyplývají z norem ČSN EN 62271-1 ed.2 a ČSN EN 62271-102. Stručně shrnuto, jsou na odpojovače dle těchto norem kladeny následující požadavky: schopnost trvalého přenosu jmenovité hodnoty proudu bez překročení dovoleného oteplení, v zapnuté poloze vydržet tepelné a mechanické namáhání působením zkratového proudu, splňovat dostatečnou izolaci a izolační vzdálenosti, zajistit dostatečný tlak ve spojích, neumožnit vnějším vlivům a elektrodynamickým silám změnu polohy zapnuto nebo vypnuto, současnost spínání vícepólových přístrojů, ochranné uzemnění a korozivzdornost proudovodné dráhy.

V této práci bylo sledováno pouze oteplení, proto bylo při návrhu úprav přístroje, které by vedly k finančním úsporám, zaměřeno na praporce, které byly předdimenzované a zároveň provedené úpravy neovlivňují izolační vzdálenosti ani působení elektrodynamických sil.

U velmi ekonomicky navrženého přístroje by se mělo oteplení částí dle [22] pohybovat kolem 95% normou dovolené hodnoty. Získaná hodnota cca 20 K odpovídá pouze 27% dovoleného oteplení. V takovém případě lze i nepatrnou úpravou předdimenzovaných částí, která by znamenala mírné zmenšení provozní spolehlivosti, dosáhnout velkých úspor, které spočívají především v použití méně materiálu, mědi – tedy zmenšení průřezu proudovodné dráhy, ale také ve zjednodušení výroby.

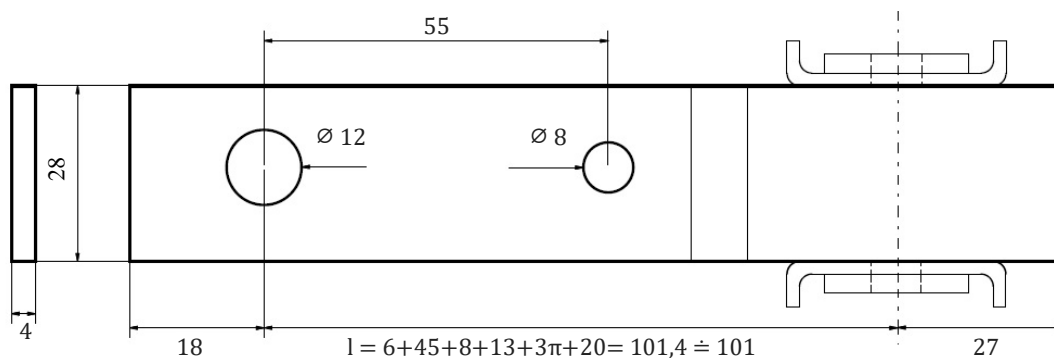
Obr. 8-1 znázorňuje praporec měřeného objektu v rozvinuté formě, kde kolem místa ohybu dochází k zúžení praporce ze 40 mm na 36 mm. Dále jsou zde tři otvory, jeden pro připojení přívodu a další dvě pro uchycení kloubu k praporci a obou těchto částí k podpěrnému izolátoru.



**Obrázek 8-1 Praporec odpojovače - rozvinutý tvar**

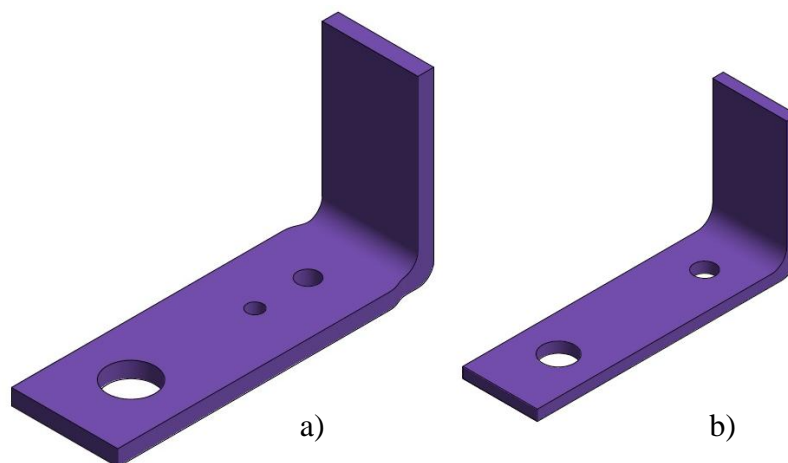
Výroba takového praporce by se dala zjednodušit o zúžení v blízkosti ohybu, které sledované oteplení ještě zvyšuje o koeficient zúžení zohledněný při výpočtu odporu. Dále by se tak vyhnulo nadbytečnému obrábění, což by vedlo k úsporám. K určitému ušetření a zmenšení odporu praporce dojde rovněž při nahrazení dvou šroubů k uchycení praporce k podpěrnému izolátoru šroubem jedním. Tato úprava by nejspíše způsobila snížení provozní spolehlivosti, zvláště na vstupu, kde je uchycen ještě kloub, a šroub by byl o to více mechanicky namáhán. Provozní schopnost by však měla být zachována. Pro větší spolehlivost lze případně pouze nahradit šroub M8 za menší M6. Pro jmenovité napětí 12 kV je toto uchycení dvěma šrouby M6 vyhovující. Podobně to platí pro šroubové spojení přívodního kabelu a praporce, kde u měřeného přístroje byl použit šroub se šestihrannou hlavou velikosti M16x45, pro tento typ odpojovače by však byl postačující šroub o průměru 12, např. M12x25.

Velké úspory lze najít již ve zmiňovaném průřezu vodiče, který lze vzhledem k předimenzování zmenšit. Upravený praporec by mohl mít podobu – viz Obr. 8-2.



**Obrázek 8-2 Upravený praporec - rozvinutý tvar**

Průřez vodiče byl upraven na 28x4. Délka praporce se zkrátila především na krajích, činná délka  $l$  zůstala přibližně stejná proto, aby velikost odporu nebyla ovlivněna jevem blízkosti. V Příloze 3 byl nejdříve proveden výpočet původního praporce, na základě kterého je v další části Přílohy 3 uveden kontrolní výpočet oteplení pro zjištění vhodnosti změn. Odpojovač byl uvažován ve vodorovné poloze a výpočty zahrnovaly zjednodušení v podobě zanedbání ovlivnění přechodovými odpory na jednotlivých kontaktech, kde byl určen pouze maximální dovolený stykový odpor pro jmenovitý proud  $R_{sI} = 0,15 \text{ m}\Omega$ , a uvažování celé plochy praporce jako chladícího povrchu. Výpočtem zjištěná hodnota oteplení byla  $\theta'_{1U} = 55,02 \text{ K}$ . Provedený výpočet odpovídá praporci na vstupu, kde je uchycení kloubu, a protože hodnota oteplení na výstupu zjištěná měřením byla nižší, předpokládá se, že se ani na výstupu upraveného odpojovače nepřesáhne dovolené oteplení. Hodnota přibližně 55 K odpovídá 73 % dovoleného oteplení, další zmenšování průřezu by však mohlo vést k nebezpečnému snížení mechanické pevnosti a dále musí odpojovač krátkodobě vydržet i zkratový proud, proto je lepší mít určitou rezervu. Na Obr. 8-3 a) a 8-3 b) jsou pro srovnání původní praporec a praporec s navrženými úpravami.



**Obrázek 8-3 Srovnání praporců**



## 9. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vytvoření přehledu metod diagnostiky silnoproudých elektrických zařízení s následným provedením teplotní diagnostiky, na základě které byly navrženy úpravy přístroje.

Druhá kapitola se věnuje významu a možnostem diagnostiky obecně, třetí kapitola poté byla věnována diagnostice silnoproudých zařízení. Ve stručnosti byly popsány nejběžněji používané metody při prediktivní údržbě přístrojů rozvodny vn. Dále byla přehledně zpracována tabulka metod diagnostiky silnoproudých zařízení včetně údajů, na kterých zařízeních se provádějí a jaké problémy či závady mohou detekovat.

Ve čtvrté kapitole byly popsány způsoby namáhání proudovodné dráhy, zvlášť tepelné namáhání. V páté kapitole byly popsány metody měření přechodového odporu se svými výhodami a nevýhodami.

V následující kapitole byly vysvětleny výhody a nevýhody dotykového a bezdotykového měření teplot a uvedeny jednotlivé typy teploměrů užívaných v praxi. Větší pozornost pak byla věnována termovizním systémům, kterých bylo použito pro praktické měření bakalářské práce.

Sedmá kapitola se pak zabývá praktickým měřením a teplotní diagnostikou odpínače CUB a odpojovače QAK. Nejdříve byly změřeny přechodové odpory na všech kontaktech proudovodné dráhy přístrojů pro zjištění teoretických míst největších tepelných ztrát. Poté byla pomocí termovizní kamery sledována změna teplot v čase a zaznamenávány termosnímky. Aby bylo možné provést vyhodnocení, musela být nejdříve určena emisivita jednotlivých částí odpínače, což bylo pro neznalost použitých materiálů, povrchových úprav a stupně jejich oxidace provedeno pomocí referenčního teploměru a termovizní kamery. Následně je zaznamenán a graficky zpracován průběh oteplení přístrojů se slovním vyhodnocením. Na konci kapitoly jsou rovněž uvedeny základní pravidla měření termovizní kamerou, které je třeba respektovat.

Na základě provedené diagnostiky byly navrženy úpravy odpojovače, které by vedly ke snížení výrobních nákladů při zachování stávajících technických parametrů. Provedené úpravy byly zaměřeny na porce.

# Literatura

- [1] MALEC, Zdeněk. *Technická diagnostika*. Brno: VUT, 1991, 185 s. ISBN 80-214-0322-5.
- [2] LEITL, Rudolf. *Spolehlivost elektrotechnických systémů*. Praha: SNTL, 1990, 287 s. ISBN 80-03-00408-X.
- [3] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. : il. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [4] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN, 2006, 406 s. : il. ISBN 80-7300-158-6.
- [5] *Predictive Maintenance Technologies That Enhance Power Equipment Reliability* [online]. Palatine: Schneider Electric USA, 2012 [cit. 2018-11-27]. Dostupné z: [https://www.schneider-electric.com/en/download/document/998-2095-01-16-12AR0\\_EN/](https://www.schneider-electric.com/en/download/document/998-2095-01-16-12AR0_EN/).
- [6] *Predictive Maintenance Program-Chapter 4. Rules of Thumb for Maintenance and Reliability Engineers*. 2008, s. 47-56. DOI: 10.1016/B978-075067862-9.50005-8. ISBN 978-0-7506-7862-9.
- [7] HAVELKA, Otto, Bohuslav DUBRAVEC, Boleslav GROSS, Vladimír HOMA a Vladimír NOVOTNÝ. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL, 1985, 440 s. ISBN 04-529-85.
- [8] BUŠOV, Bohuslav. *Učební texty – Elektrické přístroje (BEPR)* [Elektronické učební texty]. [cit. 2018-12-01].
- [9] BÁRTA, Karel a Zdeněk VOSTRACKÝ. *Spínací přístroje velmi vysokého napětí*. Praha: Bratislava: SNTL / Alfa, 1983, 445 s. ISBN 04-525-83.
- [10] ALL ABOUT CIRCUITS. Kelvin (4-wire) resistance measurement. In: *Allaboutcircuits* [online]. [cit. 2018-12-22]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-8/kelvin-resistance-measurement/>.
- [11] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN, 2005, 239 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [12] BEJČEK, Ludvík. *Měření neelektrických veličin*. Brno: VUT, 1987, 120 s. ISBN 55-619/1-87.
- [13] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: ČVUT, 1996, 315 s. ISBN 80-01-01500-9.
- [14] KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. *Měřicí a řídicí technika: Měření teploty* [online]. c2005 [cit. 2018-12-24]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/>.
- [15] HUŠEK, Miloš. *Princip bezdotykového měření teploty* [online]. c2010 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>.



- [16] KOPAL, Ivan a Pavol KOŠTIAL. *Základy infračervenej termografie: experimentálne metódy materiálového inžinierstva*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra materiálového inženýrství, 2011. ISBN 978-80-248-2519-9.
- [17] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 153 s. : il. ISBN 80-7300-180-2.
- [18] W-Technika group s.r.o. – *Oficiální dodavatel FLIR* [online]. Praha: FLIR dodavatel termokamer, c2018 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <http://www.termokamery-flir.cz/>.
- [19] *Leading the way in Thermal Imaging: SATIR PRODUCT CATALOGUE* [online]. Guangzhou: SATIR, 2009 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://sup.xenya.si/sup/info/satir/SATIR%20Catalog.pdf>.
- [20] ČSN EN 62271-1 ed.2. *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení: Společná ustanovení pro spínací a řídicí zařízení střídavého proudu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [21] IVEP, a.s.[online]. Brno: Ivep, a.s., c2017 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.ivep.cz/cz/produkty/vnitрни-odpojovace-odpinace-zkratovace-a-uzemnovace/vnitрни-odpojovace-qak-qakz>.
- [22] BUŠOV, Bohuslav. *Elektrické přístroje – podklady a příklady pro navrhování*. Brno: VUT, 2013, 190 s.

# Seznam symbolů a zkratk

## Zkratky:

CAT	...	Computer Aided Testing (počítačové testování)
DTA	...	Diferenční termická analýza
TMA	...	Termomechanická analýza
TG	...	Termogravimetrie
FPA	...	Focal Plane Arrays (kamery s maticovým detektorem)
VN	...	vysoké napětí
ČSN	...	česká technická norma
OG	...	oxidační plyny (např. vzduch, suchý vzduch)
NOG	...	neoxidační plyny (např. SF <sub>6</sub> , N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> )
SF <sub>6</sub>	...	fluorid sírový
CO <sub>2</sub>	...	oxid uhličitý
CF <sub>4</sub>	...	tetrafluormethan

## Symboly:

$U_r$	...	Jmenovité napětí	[V]
$U_p$	...	Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu	[V]
$I_r$	...	Jmenovitý proud	[A]
$I_k$	...	Jmenovitý krátkodobý výdržný proud	[A]
$I_p$	...	Jmenovitý dynamický proud	[A]
$q$	...	elektrický náboj	[C]
$v$	...	rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$B$	...	magnetická indukce	[T]
$F$	...	síla	[N]
$I$	...	elektrický proud	[A]
$dF$	...	elementární síla	[N]
$Q$	...	teplo (tepelné ztráty)	[J]
$R$	...	odpor vodiče	[Ω]
$dt$	...	elementární časový okamžik	[s]
$\alpha_0$	...	součinitel přestupu tepla	[Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$A$	...	plocha	[m <sup>2</sup> ]

$c$	...	objemová tepelná kapacita	$[\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}]$
$V$	...	objem	$[\text{m}^3]$
$\varrho(\vartheta)$	...	teplotně závislá rezistivita	$[\Omega\text{m}]$
$S$	...	průřez vodiče	$[\text{m}^2]$
$k_p$	...	činitel povrchového zhuštění	$[-]$
$k_{bl}$	...	činitel jevu blízkosti	$[-]$
$f$	...	frekvence	$[\text{Hz}]$
$\mu$	...	permeabilita prostředí	$[\text{H.m}^{-1}]$
$R_s$	...	přechodový odpor	$[\Omega]$
$R_u$	...	užínový odpor	$[\Omega]$
$R_w$	...	odpor cizích vrstev	$[\Omega]$
$k_n$	...	činitel zahrnující druh materiálu a cizích vrstev	$[\Omega]$
$F_k$	...	přítlačná síla	$[\text{N}]$
$n$	...	činitel udávající druh kontaktního styku	$[-]$
$U_s$	...	úbytek napětí	$[\text{V}]$
$H_e$	...	intenzita vyzařování	$[\text{Wm}^{-2}]$
$H_0$	...	intenzita vyzařování dokonale černého tělesa	$[\text{Wm}^{-2}]$
$H_{0\lambda}$	...	spektrální hustota intenzity vyzařování	$[\text{Wm}^{-3}]$
$\varepsilon$	...	emisivita	$[-]$
$\theta$	...	oteplení	$[\text{°C}]$
$c_1$	...	1.radiační konstanta	$[\text{Wm}^{-2}]$
$c_2$	...	2.radiační konstanta	$[\text{m.K}]$
$c_3$	...	3.radiační konstanta	$[\text{m.K}]$
$\lambda$	...	vlnová délka	$[\text{m}]$
$T$	...	absolutní teplota	$[\text{K}]$
$T_R$	...	radiační teplota	$[\text{K}]$
$h$	...	Planckova konstanta	$[\text{J.s}]$
$c$	...	rychlost světla ve vakuu	$[\text{m.s}^{-1}]$
$k$	...	Boltzmannova konstanta	$[\text{J.K}^{-1}]$
$\sigma$	...	Stefan-Boltzmannova konstanta	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}]$

## Seznam příloh

<b>Příloha 1 -</b>	Tabulka naměřených teplot – odpojovač.....	67
<b>Příloha 2 -</b>	Oteplení proudovodných částí odpojovače.....	68
<b>Příloha 3 -</b>	Výpočet oteplení praporců.....	69

## Příloha 1 – Tabulka naměřených teplot - odpojovač

Pól 1		kabel										
		izolace	přechod na oko	oko kabelu	praporec na vstupu	kloub - uchycení	čep na pružině	feromag. příložky	nuž	výstupní praporec	patice izolátoru	polyblivý izolátor
I [A]	t [min]	θ <sub>1</sub> [°C]	θ <sub>2</sub> [°C]	θ <sub>3</sub> [°C]	θ <sub>4</sub> [°C]	θ <sub>5</sub> [°C]	θ <sub>6</sub> [°C]	θ <sub>7</sub> [°C]	θ <sub>8</sub> [°C]	θ <sub>9</sub> [°C]	θ <sub>10</sub> [°C]	θ <sub>11</sub> [°C]
400	0	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7
400	1	23,8	24,3	27,9	31,4	30,6	29,6	31,7	32,8	32,0	23,7	23,7
400	2	24,4	25,1	28,9	32,5	31,3	31,3	32,2	32,8	34,3	23,9	23,7
400	3	25,2	25,9	29,4	34,0	32,1	31,8	32,6	33,6	34,7	24,1	24,1
400	4	25,6	26,2	29,9	34,6	32,8	32,0	32,9	34,1	35,2	24,4	24,4
400	5	26,0	26,9	30,1	34,9	33,3	32,5	33,5	34,7	35,6	24,7	24,9
400	6	26,5	27,2	31	35,3	33,7	32,8	33,6	35,1	35,8	25,0	25,1
400	7	26,7	27,6	31,7	35,9	33,9	33,0	33,6	35,4	35,9	25,4	25,4
400	8	27,1	28,1	32,2	36,2	34,0	33,8	33,9	35,6	36,3	25,7	25,8
400	9	27,5	28,5	32,6	36,3	34,4	34,0	34,2	36,1	36,4	25,8	26,2
400	10	28,1	29,6	33,0	37,0	35,8	34,8	35,2	36,3	36,7	26,8	26,9
400	14	29,3	30,6	34,0	38,0	36,4	35,6	35,7	36,9	36,9	27,7	27,9
400	20	31,1	32,2	35,7	38,8	37,8	36,2	36,2	37,3	37,6	29,0	29,0
400	25	32,3	33,3	36,8	39,1	38,4	37,2	36,7	37,6	37,8	30,2	30,0
400	30	33,3	34,8	37,9	39,4	39,2	37,4	37,0	38,3	38,8	31,0	31,1
400	35	34,3	35,8	38,8	39,7	39,6	38,6	37,5	38,7	39,3	31,7	31,6
400	40	34,8	36,6	39,0	40,1	40,2	39,3	37,8	39,0	39,1	32,0	32,0
400	45	35,7	37,2	39,6	40,5	40,9	39,5	38,2	39,7	39,0	32,6	32,5
400	50	36,0	37,6	39,8	40,3	40,9	39,7	38,7	40,2	39,4	33,3	32,8
400	55	36,7	38,2	40,4	40,9	41,4	40,9	38,9	40,1	40,2	33,6	33,4
400	60	36,9	38,4	40,9	40,8	41,6	41,7	39,1	40,6	40,0	34,4	33,9
400	65	37,2	38,6	41,8	40,9	41,9	41,6	39,3	40,8	40,4	34,5	34,2
400	70	37,6	38,7	42,1	41,4	42,6	41,7	39,9	41,1	40,8	34,9	34,2
400	75	37,6	38,9	42,7	41,5	42,9	41,8	39,8	41,1	41,2	34,8	34,4
400	80	38,0	38,9	42,9	41,7	42,9	42,2	40,0	41,5	41,3	34,9	34,5
400	85	38,1	39,0	43,0	41,8	43,1	42,1	40,1	41,6	41,7	34,9	34,4
400	90	38,3	39,1	42,9	42,0	43,1	42,2	40,2	41,7	41,8	35,0	34,5
400	95	38,4	39,0	43,0	42,4	43,0	42,1	40,4	41,7	41,8	35,2	34,6
400	100	38,4	39,1	43,0	42,6	43,1	42,2	40,7	41,8	41,9	35,4	34,6
400	105	38,5	39,2	43,1	42,7	43,0	42,2	40,9	41,8	41,9	35,4	34,8
400	110	38,4	39,1	43,0	42,8	42,9	42,1	41,0	41,8	41,9	35,4	34,7
400	115	38,5	39,2	43,1	42,8	43,1	42,1	41,1	41,9	42,0	35,5	34,8
400	120	38,5	39,2	43,2	42,9	43,2	42,2	41,2	41,9	42,0	35,6	34,9

## Příloha 2 – Oteplení proudovodných částí odpojovače

Pól 1		kabel										
		izolace	přechod na oko	oko kabelu	praporec na vstupu	kloub - uchycení	čep na pružině	feromag. příložky	nůž	výstupní praporec	paice izolátoru	pohyblivý izolátor
I [A]	t [min]	$\theta_1$ [K]	$\theta_2$ [K]	$\theta_3$ [K]	$\theta_4$ [K]	$\theta_5$ [K]	$\theta_6$ [K]	$\theta_7$ [K]	$\theta_8$ [K]	$\theta_9$ [K]	$\theta_{10}$ [K]	$\theta_{11}$ [K]
400	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
400	1	0,1	0,6	4,2	7,7	6,9	5,9	8,0	9,1	8,3	0,0	0,0
400	2	0,7	1,4	5,2	8,8	7,6	7,6	8,5	9,1	10,6	0,2	0,0
400	3	1,5	2,2	5,7	10,3	8,4	8,1	8,9	9,9	11,0	0,4	0,4
400	4	1,9	2,5	6,2	10,9	9,1	8,3	9,2	10,4	11,5	0,7	0,7
400	5	2,3	3,2	6,4	11,2	9,6	8,8	9,8	11,0	11,9	1,0	1,2
400	6	2,8	3,5	7,3	11,6	10,0	9,1	9,9	11,4	12,1	1,3	1,4
400	7	3,0	3,9	8,0	12,2	10,2	9,3	9,9	11,7	12,2	1,7	1,7
400	8	3,4	4,4	8,5	12,5	10,3	10,1	10,2	11,9	12,6	2,0	2,1
400	9	3,8	4,8	8,9	12,6	10,7	10,3	10,5	12,4	12,7	2,1	2,5
400	10	4,4	5,9	9,3	13,3	12,1	11,1	11,5	12,6	13,0	3,1	3,2
400	14	5,6	6,9	10,3	14,3	12,7	11,9	12,0	13,2	13,2	4,0	4,2
400	20	7,4	8,5	12,0	15,1	14,1	12,5	12,5	13,6	13,9	5,3	5,3
400	25	8,6	9,6	13,1	15,4	14,7	13,5	13,0	13,9	14,1	6,5	6,3
400	30	9,6	11,1	14,2	15,7	15,5	13,7	13,3	14,6	15,1	7,3	7,4
400	35	10,6	12,1	15,1	16,0	15,9	14,9	13,8	15,0	15,6	8,0	7,9
400	40	11,1	12,9	15,3	16,4	16,5	15,6	14,1	15,3	15,4	8,3	8,3
400	45	12,0	13,5	15,9	16,8	17,2	15,8	14,5	16,0	15,3	8,9	8,8
400	50	12,3	13,9	16,1	16,6	17,2	16,0	15,0	16,5	15,7	9,6	9,1
400	55	13,0	14,5	16,7	17,2	17,7	17,2	15,2	16,4	16,5	9,9	9,7
400	60	13,2	14,7	17,2	17,1	17,9	18,0	15,4	16,9	16,3	10,7	10,2
400	65	13,5	14,9	18,1	17,2	18,2	17,9	15,6	17,1	16,7	10,8	10,5
400	70	13,9	15,0	18,4	17,7	18,9	18,0	16,2	17,4	17,1	11,2	10,5
400	75	13,9	15,2	19,0	17,8	19,2	18,1	16,1	17,4	17,5	11,1	10,7
400	80	14,3	15,2	19,2	18,0	19,2	18,5	16,3	17,8	17,6	11,2	10,8
400	85	14,4	15,3	19,3	18,1	19,4	18,4	16,4	17,9	18,0	11,2	10,7
400	90	14,6	15,4	19,2	18,3	19,4	18,5	16,5	18,0	18,1	11,3	10,8
400	95	14,7	15,3	19,3	18,7	19,3	18,4	16,7	18,0	18,1	11,5	10,9
400	100	14,7	15,4	19,3	18,9	19,4	18,5	17,0	18,1	18,2	11,7	10,9
400	105	14,8	15,5	19,4	19,0	19,3	18,5	17,2	18,1	18,2	11,7	11,1
400	110	14,7	15,4	19,3	19,1	19,2	18,4	17,3	18,1	18,2	11,7	11,0
400	115	14,8	15,5	19,4	19,1	19,4	18,4	17,4	18,2	18,3	11,8	11,1
400	120	14,8	15,5	19,5	19,2	19,5	18,5	17,5	18,2	18,3	11,9	11,2

### Příloha 3 – Výpočet oteplení praporců

Provedené výpočty a rovnice vycházejí z [22].

Výpočet oteplení původního praporce:

- Měrný odpor mědi při předpokládaném oteplení 20 K, které bylo zjištěno měřením:

$$\rho_{Cu} = \rho_{20}(1 + \alpha_{20} \cdot \theta_p)$$

kde  $\rho_{Cu}$  je měrný odpor mědi při předpokládaném oteplení  $\theta_p$ ,

$\rho_{20}$  měrný odpor při teplotě 20 °C a

$\alpha_{20}$  teplotní součinitel odporu při 20 °C.

$$\rho_{Cu} = 1,68 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0042 \cdot 20) = 1,821 \cdot 10^{-8} \Omega m.$$

- Rozměry byly znázorněny na Obr. 8-1. Činitele zvýšení odporu  $k_{0I}$  –  $k_{0III}$  zúžením proudovodné dráhy byly odečteny z [22], Obr. 2-5, str. 31.

$$b = 40 \text{ mm}; h = 6 \text{ mm}$$

$$\text{I. } a_I = 40 - 6 = 34; \frac{a}{b} = \frac{34}{40} = 0,85 \dots \text{typ 4} \rightarrow k_{0I} = 1,15$$

$$\text{II. } a_{II} = 40 - 8 = 32; \frac{a}{b} = \frac{32}{40} = 0,8 \dots \text{typ 4} \rightarrow k_{0II} = 1,2$$

$$\text{III. } a_{III} = 40 - 4 = 36; \frac{a}{b} = \frac{36}{40} = 0,9 \dots \text{typ 1} \rightarrow k_{0III} = 1,03$$

- Určení činitele povrchového jevu:

$$\frac{b}{h} = \frac{40}{6} = 6,67$$

$$S = b \cdot h = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu}}} = \sqrt{\frac{2,4 \cdot 10^{-4} \cdot 50}{1,821 \cdot 10^{-8}}} = 811,775$$

Poté byl z [22], Obr. 2-3, str. 29 odečten koeficient skinefektu  $k_p = 1,035$ .

- Modifikovaná rovnice 4.7 pro určení ohmického odporu vodiče konstantního průřezu s uvažováním skinefektu a činitelů zvýšení odporu zúžením:

$$R_p = \frac{\rho_{Cu}}{S} (l + b \cdot (k_{0I} + k_{0II} + k_{0III} - 3)) \cdot k_p$$

$$R_p = \frac{1,821 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{-3}} (1,09 \cdot 10^{-1} + 4 \cdot 10^{-2} \cdot (1,15 + 1,2 + 1,03 - 3)) \cdot 1,035$$

$$R_p = 9,754 \cdot 10^{-6} \Omega$$

- Emisivita byla určena v praktické části bakalářské práce:  $\varepsilon = 0,19$ .

- Měrná chladiivost povrchu:

- Určení měrné chladiivosti zářením  $\alpha_z$  vychází z rovnice získané aproximací z [22], Tab. 2-10, str. 52, odpovídající emisivitě  $\varepsilon = 0,19$  a  $T_0 = 40^\circ\text{C}$ :

$$\alpha_z = 1,4 + 0,0076 \cdot \theta_p.$$

Přepočtem na předpokládanou teplotu  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  byla získána finální rovnice:

$$\alpha_z = 1,2 + 0,0036 \cdot \theta_p$$

$$\alpha_z = 1,2 + 0,0036 \cdot 20 = 1,272 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

- Pro zjištění měrné chladiivosti prouděním pro šířku pasu 40 mm byla rovněž aproximací z [22], Tab. 2-10, str. 52, získána rovnice:

$$\alpha_k = \left( \frac{6 - 4,3}{40} + 4,3 \right) + \left( \frac{0,09 - 0,055}{40} + 0,055 \right) \cdot \theta_p$$

$$\alpha_k = 4,725 + 0,0638 \cdot \theta_p = 4,725 + 0,0638 \cdot 20 = 6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

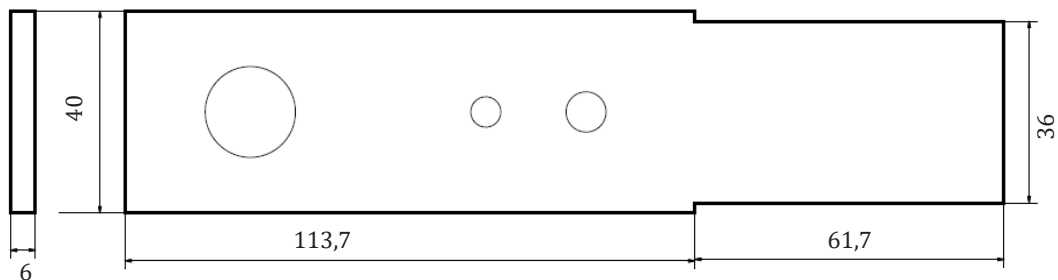
Celková měrná chladiivost je dána vztahem:

$$\alpha_0 = N \cdot \alpha_z + \alpha_k,$$

kde činitel stínění  $N$  byl uvažován 0,8:

$$\alpha_0 = 0,8 \cdot 1,272 + 6 = 7,018 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

- Pro výpočet povrchu praporce byl brán zjednodušující pohled znázorněný na Obr. 1, kde je pozvolné zúžení nahrazeno ostrými hranami:



**Obr. 1 Původní praporec**

$$S_{c1} = 113,7 \cdot 40 \cdot 2 + 113,7 \cdot 6 \cdot 2 + 6 \cdot 40 + 2 \cdot 6 \cdot 2 + 61,7 \cdot 36 \cdot 2 + 36 \cdot 6 + 61,7 \cdot 6 \cdot 2$$

$$S_{c1} = 16123,2 \text{ mm}^2$$

Od této plochy bylo třeba odečíst plochy styku, které nebyly uvažovány jako chladící plocha:

$$\text{a. přívodní svorky} \quad S_p = 30 \cdot 35 = 1050 \text{ mm}^2$$

$$\text{b. izolátoru} \quad S_i = 50 \cdot 40 = 2000 \text{ mm}^2$$

$$\text{c. uchycení kloubu} \quad S_k = 50 \cdot 36 = 1800 \text{ mm}^2$$

$$\text{d. kontaktního nože} \quad S_n = 2 \cdot 6 \cdot 35 = 420 \text{ mm}^2$$



Celkový chladicí povrch praporce s 5 % plochy navíc zohledňující zvýšení chlazení částmi šroubů:

$$P_{c1} = (S_{c1} - S_p - S_i - S_k - S_n) \cdot 1,05$$

$$P_{c1} = (16123 - 1050 - 2000 - 1800 - 420) \cdot 1,05 = 11396 \text{ mm}^2$$

- Vztah pro oteplení praporce:  $\theta_1 = \frac{R_p \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot P_{c1}}$

$$\theta_1 = \frac{9,754 \cdot 10^{-6} \cdot 400^2}{7,018 \cdot 11,396 \cdot 10^{-3}} = 19,5 \text{ K}$$

Oteplení vstupního praporce získané výpočtem přibližně odpovídá hodnotě zjištěné měřením. Zároveň se příliš neliší od zvoleného předpokládaného oteplení, proto není potřeba další úpravy.

#### Výpočet oteplení modifikovaného praporce:

- Výpočet maximálního možného stykového odporu  $R_{s1}$  pro hodnotu jmenovitého proudu  $I_n$ :

$$R_{s1} \leq \frac{U_{m\check{k}}}{2I_n}$$

kde  $U_{m\check{k}}$  je napětí měknutí mědi

$$R_{s1} \leq \frac{0,12}{2 \cdot 400} = 0,15 \text{ m}\Omega.$$

- Výpočet oteplení praporce s provedenými úpravami je totožný s předchozím výpočtem, předpokládá se však vyšší hodnota oteplení.

Měrný odpor mědi při předpokládaném oteplení 65 K:

$$\rho_{Cu} = \rho_{20}(1 + \alpha_{20} \cdot \theta_p)$$

$$\rho_{Cu} = 1,68 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0042 \cdot 65) = 2,14 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}.$$

- Rozměry byly dány Obr. 8-2. Činitel zvýšení odporu  $k_0$  kruhovým odporem byl odečten z [22], Obr. 2-5, str. 31.

$$b = 28 \text{ mm}; a = 28 - 8 = 20; \frac{a}{b} = \frac{20}{28} 0,71 \dots \text{typ 4} \rightarrow k_0 = 1,35$$

- Určení skinefektu:

$$\frac{b}{h} = \frac{28}{4} = 7$$

$$S = b \cdot h = 2,8 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 1,12 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu}}} = \sqrt{\frac{1,12 \cdot 10^{-4} \cdot 50}{2,14 \cdot 10^{-8}}} = 512$$

Poté byl z [22], Obr. 2-3, str. 29 odečten koeficient skinefektu  $k_p = 1,01$ .

- Elektrický odpor:  $R_{p2} = \frac{\rho_{Cu}}{S} (l + b \cdot (k_0 - 1)) \cdot k_p$

$$R_p = \frac{2,14 \cdot 10^{-8}}{2,8 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-3}} (1,01 \cdot 10^{-1} + 2,8 \cdot 10^{-2} \cdot (1,35 - 1)) \cdot 1,01$$

$$R_p = 2,19 \cdot 10^{-5} \Omega$$

- Měrná chladivost povrchu:

- Rovnice pro určení měrné chladivosti zářením  $\alpha_z$  je stejná jako ve výpočtu původního praporec:  $\alpha_z = 1,2 + 0,0036 \cdot \theta_p$

$$\alpha_z = 1,2 + 0,0036 \cdot 65 = 1,434 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

- Rozdílná rovnice je pro zjištění měrné chladivosti prouděním pro šířku pasu 28 mm, byla zjištěna opět aproximací z [22], Tab. 2-10, str. 52:

$$\alpha_k = \left(6 - \frac{6 - 4,3}{40} \cdot 18\right) + \left(0,09 - \frac{0,09 - 0,055}{40} \cdot 18\right) \cdot \theta_p$$

$$\alpha_k = 5,235 + 0,074 \cdot \theta_p = 5,235 + 0,074 \cdot 65 = 10,045 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Pro určení celkové měrné chladivosti je uvažován stejný činitel stínění  $N = 0,8$ :

$$\alpha_{02} = 0,8 \cdot 1,434 + 10,045 = 11,19 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

- Chladicí povrch byl pro zjednodušení brán jako celý povrch praporec, který je v rozvinutém tvaru na Obr. 2.



**Obr. 2 Upravený praporec**

$$S_{c2} = 28 \cdot 146 \cdot 2 + 28 \cdot 4 \cdot 2 + 4 \cdot 146 \cdot 2 = 9568 \text{ mm}^2.$$

Od této plochy bylo třeba odečíst rozdílnou plochu styku:

- a. přívodní svorky  $S_p = 28 \cdot 35 = 980 \text{ mm}^2$

- b. izolátoru  $S_i = 28 \cdot 50 = 1400 \text{ mm}^2$

- c. uchycení kloubu  $S_k = 28 \cdot 50 = 1400 \text{ mm}^2$

- d. kontaktního nože  $S_n = 2 \cdot 4 \cdot 35 = 280 \text{ mm}^2$

Celkový chladicí povrch praporce s 5 % plochy navíc zohledňující zvýšení chlazení částmi šroubů:  $P_{c2} = (S_{c2} - S_p - S_i - S_k - S_n) \cdot 1,05$

$$P_{c2} = (9568 - 980 - 1400 - 1400 - 280) \cdot 1,05 = 5783,4 \text{ mm}^2$$

- Hodnota oteplení upraveného praporce:  $\theta_{1u} = \frac{R_p \cdot I^2}{\alpha_{02} \cdot P_{c2}}$

$$\theta_{1u} = \frac{2,19 \cdot 10^{-5} \cdot 400^2}{11,19 \cdot 5,783 \cdot 10^{-3}} = 54,15 \text{ K}$$

- Prvotní předpoklad oteplení nebyl přesný,  $65 > 54,15$ . Přesnější výsledek lze získat iterací. Na velikosti oteplení je totiž závislá rezistivita a měrná chladivost, které se s jiným předpokládaným oteplením změní:

$$\rho'_{Cu} = 1,68 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0042 \cdot 54,15) = 2,06 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$$

S rezistivitou se sníží také elektrický odpor:

$$R'_p = \frac{2,06 \cdot 10^{-8}}{2,8 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-3}} (1,01 \cdot 10^{-1} + 2,8 \cdot 10^{-2} \cdot (1,35 - 1)) \cdot 1,01$$

$$R'_p = 2,06 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Rozdílná je také měrná chladivost:

$$\alpha'_z = 1,2 + 0,0036 \cdot 54,15 = 1,395 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\alpha'_k = 5,235 + 0,074 \cdot \theta_p = 5,235 + 0,074 \cdot 54,15 = 9,242 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\alpha'_{02} = 0,8 \cdot 1,395 + 9,242 = 10,358 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Nic dalšího ve výpočtu na oteplení závislé není, proto je výsledné oteplení:

$$\theta'_{1u} = \frac{R'_p \cdot I^2}{\alpha'_{02} \cdot P_{c2}}$$

$$\theta'_{1u} = \frac{2,06 \cdot 10^{-5} \cdot 400^2}{10,358 \cdot 5,783 \cdot 10^{-3}} = 55,02 \text{ K}$$

Hodnota 55,02 K se od předpokládané liší asi o 2 %, lze ji tak považovat za výslednou.